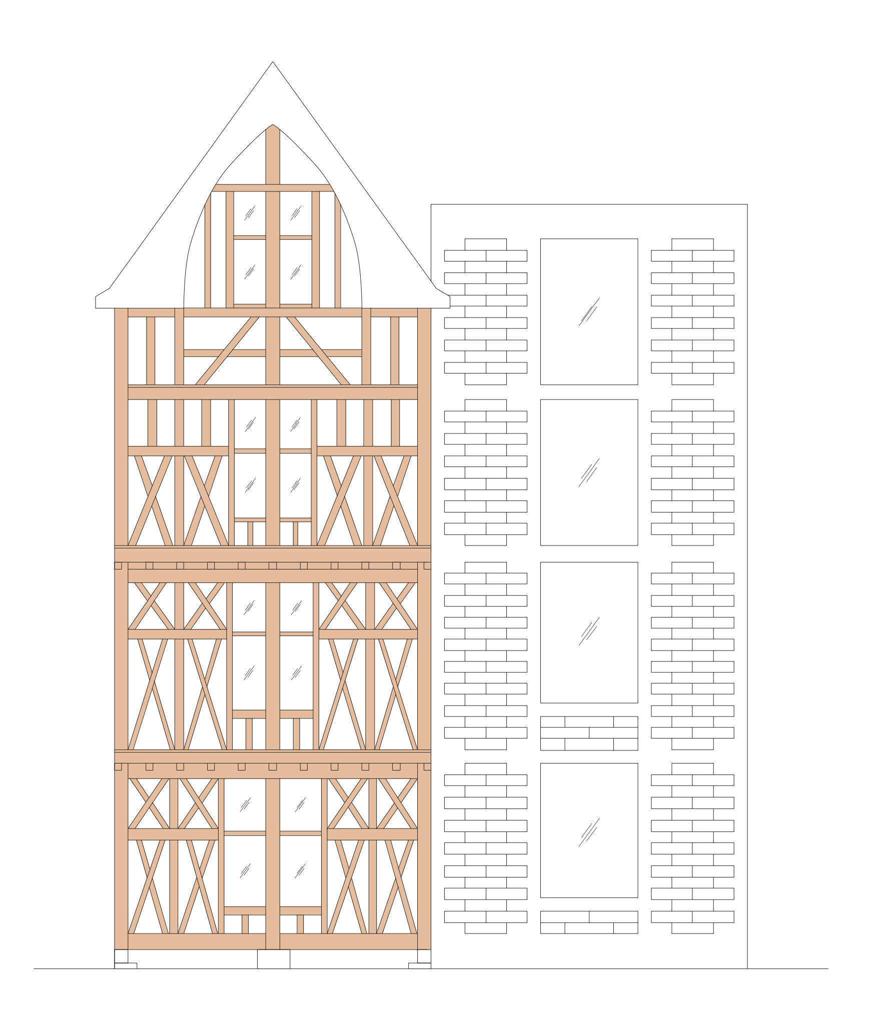


LES COLOMBAGES

- l'hybride de demain -

LES COLOMBAGES

- l'hybride de demain -

LES COLOMBAGES

- l'hybride de demain -

Mathieu Fritzinger

Énoncé théorique de master d'architecture 2017 - 18
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

COLOMBAGE : ***Pan de bois, cloison ou mur en charpente dont les vides sont remplis par une maçonnerie de plâtre, de brique, etc. (hourdis).***

Larousse
http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais

HALF-TIMBERED: *Having walls with a timber frame and a brick or plaster filling.*

Oxford living dictionary
https://en.oxforddictionaries.com

FACHWERK: *Bauweise, bei der die Wände aus einem Gerippe von Balken bestehen, dessen Zwischenräume durch Mauerwerk (Ziegelsteine, Lehm o. Ä.) ausgefüllt sind.*

Duden
https://www.duden.de

PREAMBULE Combiner des matériaux, des couleurs, des textures est une occurrence quotidienne au XXIe siècle que ce soit dans l'art, le design ou l'industrie. L'architecture n'échappe pas à ce phénomène, elle l'a peut-être même engendré il y a fort longtemps; elle combine des matériaux aux caractéristiques complémentaires afin de satisfaire les exigences en matière de confort, de structure et d'énergie. En cela, l'analogie avec l'industrie automobile s'avère notoire. En effet, là où un moteur à combustion est couplé à un moteur électrique pour réduire la consommation de carburant tout en accroissant les performances d'un véhicule, un système porteur poteaux/poutres est couplé à des murs porteurs pour garantir un abri stable et confortable aux habitants. Le présent énoncé s'efforcera de mettre en avant les avantages et les applications potentielles d'une telle synergie constructive dans le domaine de la construction durable en prenant comme référence les maisons à colombage alsaciennes connues pour leur système constructif hybride bois/torchis. Le focus sera majoritairement porté sur les performances de ces constructions, la description et la rénovation de celles-ci étant traitées largement dans d'autres publications. Un glossaire accompagnera le lecteur durant l'ensemble de l'énoncé apportant des précisions sur les termes techniques spécifiques des constructions étudiées.

INDEX



1. Ungersheim, France. Maison Joho, reconstitution à l'Ecomusée d'Alsace





2. Maison à colombage devenue monument historique en 1932

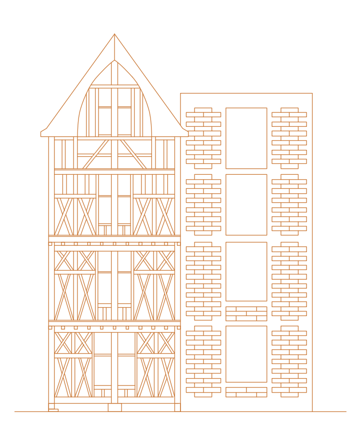
UN VERNACULAIRE OUBLIE

Les constructions à colombage, plus communément qualifiées de pan de bois, font partie du quotidien de tout alsacien qu'il vive en ville ou en campagne. En effet, l'abondance de cette architecture vernaculaire, notamment en milieu urbain historique, en fait l'un des symboles emblématiques de la région Alsace (France), *'Elsàss'* comme disent les locaux, outre son vignoble et sa gastronomie. Ces édifices nourrissent également chez le propriétaire aguerri ou non, et le touriste flâneur une grande curiosité, respectivement le temps d'une rénovation ou d'une photographie pleine de couleurs. Il est vrai qu'en regardant au delà du 'simple produit' de cette architecture vernaculaire oubliée, portée par une longue tradition constructive, se dévoile à nous un patrimoine d'une grande richesse et d'une grande complexité constructive *(fig. 2)*.

La première moitié du xxe siècle, marquée par les deux grandes guerres, abandonnera cependant quasi-totalement cette technique de construction. Cet abandon peut être mis en parallèle avec la perte des connaissances du métier de charpentier après les guerres et la flambée des prix de la matière première bois entre les deux guerres ; mais en premier lieu, il est dû à la nécessité d'une reconstruction rapide des villes et villages. En effet, cette reconstruction, supervisée par l'Etat, fut l'opportunité pour les villes de s'aligner sur les règles relatives à la construction de l'habitat et notamment celles contre le feu en restreignant l'usage du bois d'œuvre aux pignons des maisons, à leur charpente et à leurs cloisons intérieures. Ainsi les édifices en 'dur,' maçonnerie et béton remplacèrent les édifices en bois. Ce n'est que plus tard, aux débuts des années 1970, que les maisons à colombage connaissent un regain d'intérêt. Paradoxalement, cette période coïncide avec la démolition croissante de ces témoins de l'habitat rural, en partie reconstitués au sein du musée en plein air d'Ungersheim, l'Ecomusée d'Alsace.

L'architecture à colombage a-t-elle perdu toute raison d'être considérée dans une Alsace durable de demain ? Selon Pierre Frey, *« une nouvelle architecture vernaculaire peut apprendre des pratiques traditionnelles par osmose, par analogie, par réinterprétation ou par interpolation mais certainement pas par imitation »*.[1] Le présent énoncé cherchera donc à avancer les qualités intrinsèques de la combinaison terre/bois dans les constructions à colombage traditionnelles dans le but de perpétuer un système constructif vernaculaire oublié dans l'environnement architectural normé et des labels de construction du xxie siècle ; quelles matérialités, quelles réalités constructives pour une construction à colombage dans une Alsace durable de demain ?

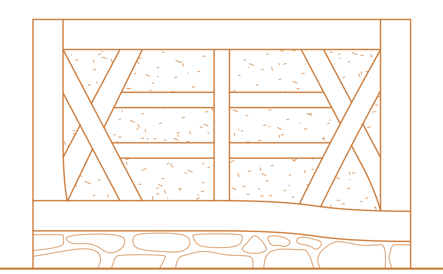
Un premier chapitre présentera brièvement les différentes variantes, autant temporelles que constructives, de ces témoins du passé par le biais d'une documentation iconographique personnelle, subjective et non exhaustive de constructions à colombage vernaculaires. Un second chapitre explorera les performances et les motivations derrière l'emploi des matériaux locaux, terre et bois, dans une architecture parasismique, rationnelle et hiérarchisée. Ce chapitre permettra de définir l'essence des constructions à colombage traditionnelles et de faire le lien avec les nouvelles constructions, les constructions contemporaines. En effet, l'histoire a marqué l'abandon des constructions à colombage mais également l'arrivée de nouveaux matériaux, comme le béton ou encore le plastique, ou même leur redécouverte, comme la brique ou le pisé. Ces innovations d'aujourd'hui qui partagent des traits communs avec leurs ancêtres en bois seront illustrées dans un troisième chapitre amorçant le débat sur les possibilités de la synergie de ces matériaux dans l'architecture de demain. Le quatrième chapitre s'attardera sur le rôle de chacun des matériaux dans leurs systèmes constructifs respectifs avant de s'interroger sur les réponses données face aux normes énergétiques et sociétales du xxie siècle. Cette analyse façonnée par la confrontation des structures à colombage et leurs homologues contemporains aboutira à un catalogue de combinaisons potentielles de matériaux pour une architecture à colombage 2.0. Une de ces options sera ensuite approfondie dans le cadre du projet de master et sera intégrée dans le contexte urbain existant de la ville médiévale de Riquewihr.



LES TÉMOINS DU PASSÉ

- *études de cas I* -

Les colombages à 'bois longs'
Les colombages à 'bois courts'



Colombages à *'bois longs'*

HISTOIRE La méthode de construction dite des *'bois longs'* caractérise l'ensemble des maisons vernaculaires alsaciennes du milieu du du XIIIe au milieu du XVe siècle. Cette méthode, origine de l'appellation des constructions à colombage, peut être divisée en trois catégories partageant toutes un même trait commun, la longueur des éléments porteurs verticaux toujours supérieure à la hauteur d'un étage.



3a. Ungersheim, France. Maison Schlierbach, reconstitution à l'Ecomusée d'Alsace

SYSTEME La première de ces catégories et la plus ancienne est celle de l'ossature à poteaux faîtiers. Ces constructions sont reconnaissables par la présence dans le mur pignon d'un poteau central continu de la base de l'ossature jusqu'au sommet du toit où il supporte la panne faîtière. Le poteau faîtier taillé dans un seul tronc joue alors un rôle porteur essentiel pour le ou les planchers d'étage et la charpente à chevron. La deuxième catégorie est liée à un changement de rôle de ce même poteau central dans un nouveau système de charpente, la charpente à chevrons-portant-ferme. Cette charpente abandonne la panne faîtière au profit d'un ou plusieurs faux-entraits. Le rôle porteur du poteau médian se limite dans ce cas uniquement au support des planchers, l'expression architecturale de l'édifice reste cependant inchangée. La troisième catégorie rompt avec la tradition du poteau médian ; elle sépare le mur pignon en deux entités autonomes dressées successivement : l'ossature inférieure des étages et l'ossature du toit. Dès lors, les poteaux faîtiers et les poteaux médians ne se développent plus uniquement sur la hauteur du pignon, tandis qu'ils sont réduits dans la partie inférieure à la hauteur séparant la sablière basse et l'entrait. L'ensemble des éléments porteurs verticaux se voit ainsi attribuer une hauteur identique généralement de un ou deux étages.

Les colombages à 'bois longs' regroupent alors l'ensemble des pans de bois caractérisés par un alignement des éléments porteurs verticaux de la sablière basse au faîte. De plus, des poteaux d'une seule pièce, c'est à dire non interrompus par les sablières d'étages, distinguent les colombages à 'bois longs' s'étendant sur plus d'un étage sous charpente.



3b. Poteau médiant filant sur deux étages



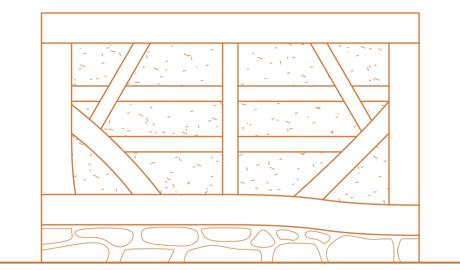
3c. Assemblage à mi-bois



3d. Revêtement extérieur sous plancher en torchis



3e. Riquewihr, France. Le Bastillon de Riquewihr



Colombages à *'bois courts'*

HISTOIRE La méthode de construction dite des 'bois courts' poursuit la dissociation de l'ossature par niveaux indépendants. Ainsi ce n'est plus uniquement l'ossature du toit qui est dressée indépendamment du reste, mais également les ossatures de chaque étage qui sont empilées les unes sur les autres par étapes distinctes. Cette caractéristique est à l'origine de l'autre dénomination courante de ces constructions, les colombages à étages superposés.



4a. Kaysersberg, France. 135 rue du Général-de-Gaulle

SYSTEME Cette méthode de construction est caractérisée par la hauteur de ses éléments verticaux limités à un seul étage. La symétrie caractéristique des colombages à 'bois longs' est abandonnée et l'alignement vertical des éléments porteurs verticaux n'est présent que dans les angles de la bâtisse avec la succession des poteaux corniers s'il s'agit d'une construction à plusieurs étages sous combles. Il n'était alors pas rare d'observer un écart d'alignement de trois à quatre mètres entre les niveaux autonomes. Ce non alignement vertical impose de renoncer au déversement vertical direct des charges devant donc être redirigées entre les étages par les sablières. Les pans de bois verticaux et horizontaux sont donc amenés à créer une carcasse rigide assurée par des assemblages à mi-bois et un dédoublement des sablières d'étage. La présence d'une sablière de plancher et d'une sablière de chambrée a permis la présence de saillies en façade à chaque étage et plus uniquement entre le rez-de-chaussée en maçonnerie et le premier étage. Ces encorbellements ont très vite trouvé leur place en ville où la surface du terrain est limitée et où tout artifice pour y remédier était le bien venu. Toujours en ville, cette méthode rendit possible la construction d'édifices publics de grande hauteur, quatre ou cinq étages ; les poteaux étant limités à un étage, la hauteur n'était plus limitée par les dimensions naturelles du bois. Cette liberté architecturale est également présente dans la composition de la façade ; plus libre elle s'adapte au besoin spécifique de chaque pièce de la maison, jusqu'à en devenir son miroir parfait. Cela concerne particulièrement le premier étage où la *'Stube,'* pièce de séjour, détermine la trame des poteaux et l'organisation des pans de bois.

Les colombages à 'bois courts' regroupent alors l'ensemble des pans de bois caractérisés par des éléments porteurs verticaux d'une longueur maximale d'un étage et de leur non alignement. De plus, ces colombages auront une certaine hétérogénéité dans leurs ouvertures, dans leur organisation jusqu'à présenter des encorbellements ou des loggias.



4b. Assemblage d’angle à mi-bois

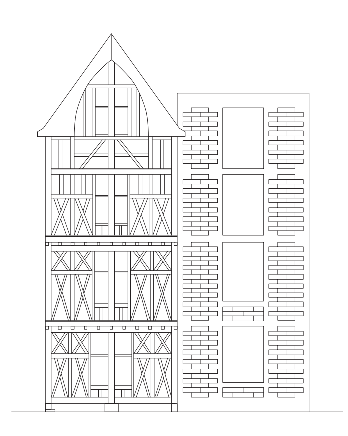


4c. Assemblage d’angle en queue d’aronde

4d. Assemblage en queue d’aronde



4e. Kaysersberg, France. Maison Buchelé (1458)



UN RATIONALISME LOCAL

Préserver les ressources
Une structure adéquate
A l'abri du temps
Un habitat passif



5. Une maison à colombage et son ossature bois



6. Mortaise apparente dans un des poteaux corniers



7. Mortaise apparente dans un des poteaux corniers

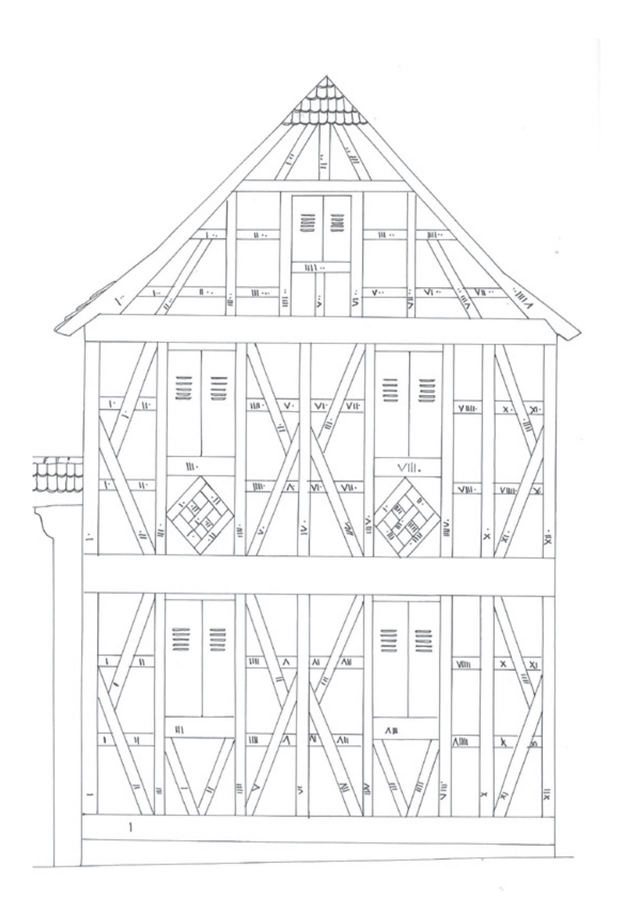
PRESERVER LES RESSOURCES

Nous le savons aujourd'hui, nos ressources naturelles ne sont pas inépuisables ; le pétrole est voué à disparaître, les sables silico-calcaires utilisés pour la fabrication du verre se font rares. Mais, cette pénurie de matières premières n'est pas une problématique récente. Elle est récurrente dans l'histoire de l'architecture et de la construction. Un des témoins les plus connus est sans doute le Colisée à Rome ; il fut partiellement détruit et les pierres récupérées furent utilisées pour ériger les constructions aux alentours. L'origine des constructions à colombage, datée vers la fin du XIIIe siècle, est également étroitement liée à une nécessité d'épargner au maximum les ressources et les matières premières locales. L'utilisation parcimonieuse, principalement du bois et de la pierre était donc fondamentale.

LE BOIS Les constructions à colombage étant essentiellement des constructions en pans de bois, l'ensemble ou presque de ses composants provient du bois et de ses dérivés. Ainsi la matière principale de toutes ces constructions provient des forêts adjacentes. Au Moyen Âge, l'Alsace dispose encore d'un bon nombre de grandes forêts comme celle des Vosges ou celle de Brumath.[2] Néanmoins, l'expansion de l'agriculture et le développement des forges amenèrent avec eux petit à petit une grande vague de déforestation et par conséquence une accessibilité réduite du matériau de construction principal, le bois. Il fallait donc réguler et limiter l'utilisation du bois dans les nouvelles constructions tout en assurant un renouvellement des forêts. A cet effet, les constructions en madriers et rondins de bois laissaient place à une construction à ossature bois qui permettait une utilisation plus parcimonieuse du bois : les colombages.

Ces derniers sont tout d'abord construits selon la méthode dite des 'bois longs' *(cf. p. 19)* ayant pour caractéristique significative la continuité à travers les étages de leurs poteaux faîtiers et de leurs poteaux corniers pour les maisons de plus d'un étage. Cette méthode n'est cependant pas sans inconvénient. En effet, seul deux essences de bois durs autochtones présentaient des troncs assez solides, rectilignes et d'une certaine longueur, dépassant fréquemment les quatre mètres, le tout nécessaire pour ce type de constructions : le chêne et le châtaigner. L'enjeu était alors de limiter non pas l'utilisation de toutes les essences de bois mais principalement d'assurer l'utilisation parcimonieuse du chêne, bois de construction par excellence. Ainsi, il était alors coutume de n'employer uniquement ce dernier pour les pièces les plus importantes du squelette (poteaux, poutres, solives, décharges) et de recourir à d'autres essences de bois plus tendres, tel que le sapin, le pin ou encore l'épicéa, pour les pièces secondaires du squelette (charpentes des combles, cloisons intérieures, etc.). Les maisons à colombage s'éloignent ainsi de plus en plus de la tradition constructive des constructions massives en bois avec l'utilisation, non pas d'une mais, d'une multitude d'essences de bois.

Une réinterprétation de l'ossature va très vite succéder à cette hybridation de l'ossature bois dans le but de préserver le chêne comme bois de construction. En effet, la méthode dite des 'bois courts' *(cf. p. 23)* apparue durant le XVe siècle va introduire un souffle nouveau aux constructions à colombage. Les poteaux faîtiers et les poteaux corniers sont maintenant interrompus à chaque niveau par les sablières d'étage ; tous les éléments principaux de l'ossature n'ont alors plus que la hauteur d'un étage. La contrainte de la longueur du tronc disparaît et le bois peut être sectionné plus librement selon les nécessités du moment. Le tronc d'un chêne n'est alors plus limité à produire un seul poteau faîtier mais peut produire une multitude de poutres ou poteaux pour le squelette, de dimensions égales ou différentes selon leurs fonctions. A cela s'ajoute la possibilité de réutilisation de pièces déjà utilisées au préalable dans d'autres constructions à colombage. En effet, le chêne étant commun à toutes les constructions à colombage et les éléments porteurs de sections similaires étant assemblés de manière à pouvoir être démontés par le biais de chevilles en bois d'acacia, il s'avère assez aisé de donner une seconde vie à ces pièces de bois en les récupérant sur d'autres maisons à colombage vouées à être démantelées. Ces éléments en bois sont alors repérables aisément par la présence de mortaises apparentes, restes de leur utilisation précédente *(fig. 6 et 7)*. Un



8. Reitwiller, France. Relevé des marques de charpentier sur une maison (1861)



9. Marques de charpentier apparentes



10. Hourdis en moellon et mortier de terre



11. Application du torchis en ballottine



12. Application du torchis sur palançon

dernier artifice est mis en place afin d'assurer une utilisation plus parcimonieuse de toutes les essences de bois, un procédé aujourd'hui commun, la préfabrication. En effet, les constructions à colombage ne sont que montées sur le chantier, leur assemblage se fait dans l'atelier du charpentier ; aucune intervention sur le bois ne se fait sur le chantier. En l'absence de moyens électroniques, le charpentier se servira d'un étalon, c'est à dire d'un tracé grandeur nature sur le sol de son atelier, comme guide. Ainsi il pourra sélectionner, dans son stock de bois neuf ou récupéré, le bois approprié pour chacune des pièces nécessaires en fonction de leur longueur, de leur section et des contraintes qu'elles auront à subir dans l'édifice. Par cette adéquation du bois à la réalité géométrique de la construction, une réduction des chutes et déchets de bois liée à l'ossature est assurée. De plus, le marquage et le traçage méticuleux des assemblages en atelier permettent un montage aisé et rapide tout en garantissant une bonne stabilité et l'absence de pièce de rechange, de roue de secours malgré les différences géométriques évidentes *(fig. 8 et 9).*

LA PIERRE Bien plus méconnue est l'utilisation de la pierre dans les constructions à colombage. Elle est principalement utilisée pour le solin, c'est à dire les fondations des maisons à colombage, mais fut aussi rapidement utilisée sur l'ensemble du rez-de-chaussée notamment en ville et dans les ruelles étroites pour d'éviter la propagation du feu comme on le verra dans la suite de l'énoncé. Néanmoins, la pierre fut utilisée dans une troisième situation : le hourdis. A l'origine, les vides du pan de bois sont remplis par un mur de moellons liés entre eux par un mortier de terre laissé ensuite apparent ou bien enduit *(fig. 10).* Cette pierre utilisée est une pierre de carrière des plus banale. Néanmoins, au Moyen Âge, elle était très convoitée pour construire les fortifications et les bâtiments de grande importance, tels les donjons et les églises. Cette pierre se faisait donc rare sur le marché et d'autant plus sur le marché privé étant un matériau peu local. Un substitut à ce matériau ʻnobleʼ sera trouvé dans le torchis.

Ce dernier est un matériau à base de terre argileuse, une terre abondante que l'on trouve sous la couche de la terre végétale à 40 – 50 centimètres de profondeur. Ainsi tout propriétaire ou exploitant d'un terrain pouvait avoir accès à ce matériau familier et bon marché. L'Alsace étant une région viticole et agricole, le reste des composants, les fibres végétales, l'eau et la chaux étaient également présents ou disponibles en abondance. Le torchis, de texture plutôt pâteuse, similaire aujourd'hui à la 'terre allégée' ou à n'importe quel crépis, avait besoin d'une structure de support également naturelle. Pour cela, les propriétaires récoltaient des branches de bois souple (noisetier si possible) dans les forêts voisines qu'ils tressent ensuite selon le principe du vannage des paniers. Sur ces palançons sera ensuite appliqué le torchis à la main ou en ballottine *(fig. 11 et 12).* Il est alors plus juste de définir ce support en bois comme substitut de la pierre plutôt que le torchis en lui-même qui est juste appliqué comme un crépis à l'extérieur comme à l'intérieur.

La brique de terre crue ou cuite remplaçait ensuite petit à petit le palançon et l'application du torchis à la main. D'abord en ville, étant considérée comme la variante luxueuse du remplissage laissée souvent apparente pour rappeler subtilement un appareillage noble de pierre de taille ; puis à la campagne par l'aisance de mise en œuvre d'une maçonnerie par rapport au torchis. La brique amena avec elle peu de temps après un autre avantage, celui de la préfabrication. Il est alors possible de prévoir l'ensemble des matériaux nécessaires à la construction de l'édifice avant son montage et de ce fait un travail simultané du charpentier et du maçon garantissant un temps de construction plus court. Cette évolution en matière de remplissage permet une disparition progressive et totale des moellons puis du support en bois dans les hourdis.

• *En résumé,* les constructions à colombage à faible empreinte écologique utilisent des matériaux locaux provenant des forêts adjacentes ou des forêts communales tout en donnant une seconde vie à des matériaux délaissés tel que la terre ou les branchages des arbres abattus pour la structure. De plus, leur système porteur à ossature et la nature de leur remplissage permettent une utilisation juste et minimale des matières premières principales du Moyen Âge : le bois et la terre. L'ajout de la préfabrication dans le processus d'assemblage de l'édifice permet, en plus de l'économie matérielle évidente, également une réduction importante du temps nécessaire au montage des différents pans de bois et ainsi une réduction de la main d'œuvre requise.



13. Eléments porteurs d'une maison à colombage

UNE STRUCUTRE ADEQUATE

La fonction première de tout abri est de protéger l'habitant des différents ires de la nature. Les maisons alsaciennes en plus de protéger de la pluie, du vent et éventuellement de la neige, doivent également procurer une protection contre les secousses sismiques. En effet, la région Alsace appartient au fossé Rhénan où de nombreuses failles sont présentes et compte ainsi parmi les régions à sismicité élevée de France métropolitaine. L'habitat vernaculaire de la région par son ossature bois de *« faible masse [...] convient très bien pour la construction parasismique de faible hauteur »*.[3] En effet, au delà du 'simple produit' de cette architecture vernaculaire oubliée et portée par une longue tradition constructive, se dévoile à nous un patrimoine d'une grande richesse et d'une grande complexité constructive. Cette complexité est le fruit d'une hiérarchie audacieuse au sein même de la structure couplée à des éléments de contreventement omniprésents et des matériaux de remplissage ductiles, déformables.

STRUCTURE PRIMAIRE Le toit est le premier élément protecteur de la maison mais également le premier à appliquer et à induire des efforts sur l'ossature et en donner les mesures. Ainsi, il est normal que la structure du pan vertical, des murs, découle directement de la forme du toit. Cependant l'influence de la structure du mur sur la structure du toit est tout aussi importante, c'est pourquoi avec l'évolution de l'ossature, la charpente évolue elle également et vice versa. Au travers de ces évolutions, les règles de conception et les mesures restaient néanmoins inchangées.

La charpente du toit repose sur un entrait qui lie entre eux les différents poteaux corniers continus ou subdivisés par hauteur d'étage et reliés entre eux par des sablières horizontales supplémentaires. Les charges liées au poids propre de la toiture et, éventuellement les charges utiles liées au poids de la neige, sont ainsi transmises verticalement aux poteaux, soumis alors uniquement à des efforts de compression.[4] La méthode de construction dite des bois longs, introduira sur la façade pignon un unique poteau intermédiaire central, également appelé poteau faîtier dans la mesure où il soutient la panne faîtière, réduisant par la même occasion la portée de l'entrait. La façade se voit donc divisée horizontalement par des sablières (sablière basse, sablière d'étage et entrait) laissant apparaître les étages, et verticalement par des poteaux (poteaux corniers et poteaux intermédiaires) subdivisant les étages en panneaux symétriques. La méthode de construction dite des bois courts gardera cette subdivision en panneaux et en étages, mais en l'absence d'un poteau faîtier central, abandonnera quasiment systématiquement la symétrie en façade ainsi que l'alignement vertical. Ces panneaux définissent le noyau porteur de la façade. Ces derniers définissent également les différents bois porteurs principaux, c'est à dire ceux soumis exclusivement au poids propre de la structure.

CONTREVENTEMENT VERTICAL Les porteurs donnent forme à une structure s'apparentant aux structures poteaux/poutres actuels et leur vulnérabilité aux efforts horizontaux latéraux (vents, secousses sismiques). Chacun des panneaux principaux se voit donc octroyer des éléments obliques de contreventement afin de rendre la forme 'indéformable'. La présence, la répétition de ces pièces obliques de contreventement et leur nature sont à l'origine des nombreuses variantes régionales des maisons à colombage. Néanmoins toutes les ossatures à colombage respectent le même principe de la triangulation contrairement au principe de contreventement par *« placage »*.[5]

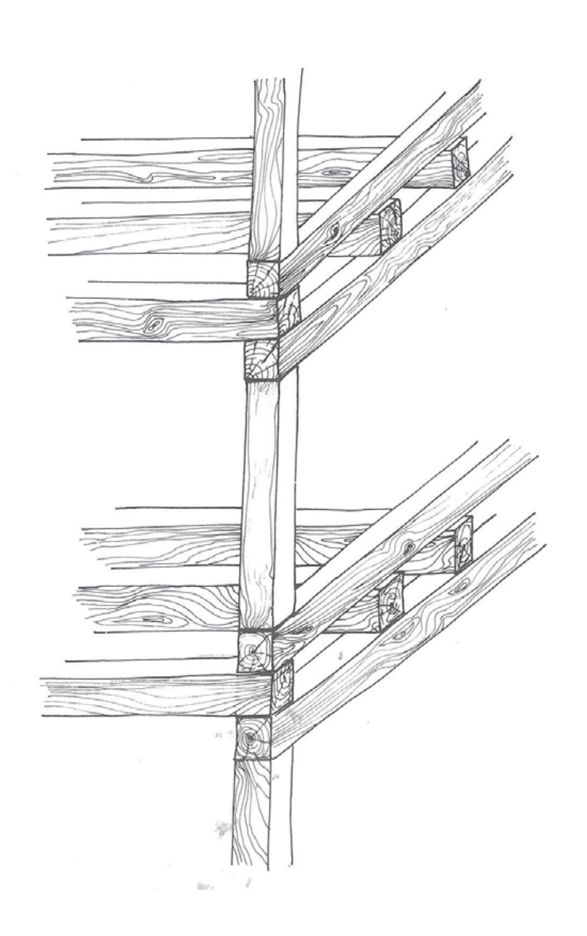
Ces éléments de construction peuvent avoir différentes formes et dénominations en fonction de leur position dans le pan de bois. Ces derniers sont toujours disposés par paires et peuvent être classés dans deux catégories différentes. La première regroupe les éléments de contreventements indépendants des poteaux principaux (croix de St André, décharge). Ils traversent obliquement les panneaux de sablière à sablière. Ils définissent ainsi des palées triangulées assumant le rôle de contreventement vertical. Cette solution est employée en moindre mesure car adéquate uniquement pour les panneaux pleins exempts de toutes ouvertures, portes ou fenêtres. La deuxième catégorie regroupe les liens obliques placés en pied (goussets et guettes) ou en tête (aisseliers) des



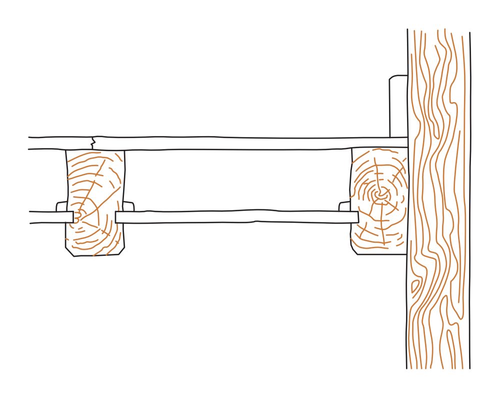
14. Assemblage mi-bois



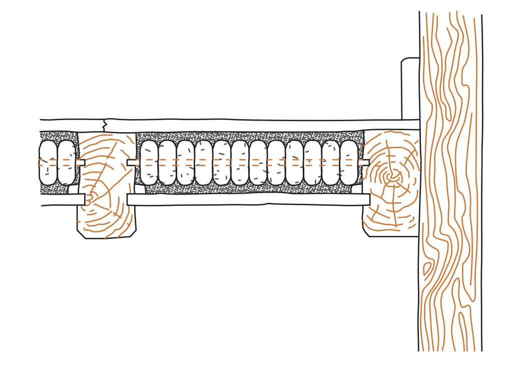
15. Mortaise et cheville



16. Méthode dites des ‘bois courts’, liaison plancher/façade



17. Plancher plein sur solive



18. Plancher en fusées

poteaux principaux. Ces derniers sont toujours disposés en paires de manière symétrique autour des poteaux intermédiaires et suivent l'angle dans le cas des poteaux corniers. La présence de renforts obliques aux poteaux met ainsi en évidence les porteurs principaux par rapport au reste de la structure.

Malgré un choix de matériaux limité au Moyen Âge, des barres inclinées rigides ont été préférées à de simples tirants, ces barres donnant aux éléments de contreventement une résistance à la traction et à la compression bien utile en cas de séisme où les efforts peuvent se retrouver inversés donnant un rôle important aux assemblages. En effet, *« les nœuds constituent des zones critiques de la structure, plus particulièrement sollicités par des charges horizontales ».*[6] Les assemblages, à mi-bois ou à tenons et mortaise *(fig. 14 et 15)*, ne diffèrent guère d'une catégorie à l'autre, leur diversité est plus fonction de l'évolution de leur technique mais leurs rôles restent inchangés. Ils assurent l'alignement des axes des poteaux, solives et contreventements dans un même plan tout en autorisant une rotation relative entre ces éléments. Les assemblages prennent ainsi le rôle d'articulations, de liaisons non rigides, offrant à la structure sa souplesse et son intégrité même après d'importantes déformations.

CONTREVENTEMENT HORIZONTAL Le pan de bois contreventé devenu indéformable sous l'action de forts vents ou de secousses sismiques reste toujours susceptible au déversement sans un plan horizontal rigide. Ce sont les pans horizontaux et inclinés de la maison à colombage qui garantissent cette fonction de diaphragme. Ainsi chaque niveau a son contreventement propre, les fondations pour le rez-de-chaussée, la charpente pour le toit et les planchers pour les niveaux intermédiaires.

La charpente des maisons à colombage est composée de fermes verticales répétées sur l'ensemble de la profondeur du bâtiment avec un entraxe régulier et liées entre-elles par une série de pannes traversantes assemblées à mi-bois. Ces éléments forment une unité structurelle où seules les tuiles sont détachées de l'ensemble par l'absence de fixation mécanique. L'assemblage à mi-bois des fermes sur les entraits est primordiale car il assure un ancrage sur toute la périphérie du bâtiment et ainsi une répartition uniforme des efforts horizontaux sur les éléments verticaux de contreventement. Il en va de même pour les planchers. Leur étroite imbrication à la façade par des assemblages *« indécrochables transforme le poutrage en une carcasse rigide »*.[7] Cette très forte dépendance mécanique est marquée en façade par la présence d'une sablière de plancher sous la poutraison et d'une sablière de chambrée au-dessus de celle-ci *(fig. 16)*. La structure du plancher perpendiculaire à la façade, se trouve donc serrée entre deux sablières horizontales assurant la continuité mécanique. Cette dernière est également assurée entre les différentes solives de plancher par le plancher cloué sur les solives *(fig. 17)* et dans certains cas un remplissage en torchis sur palançons faisant office de coutures *(fig. 18).* L'ensemble de ces pans de bois repose sur un mur périphérique. Ce solin transmet de manière uniforme les charges aux fondations en pierre. Cette fondation prend le rôle de plancher et de *« liaison parasismique en empêchant les déplacements différentiels horizontaux des murs et des poteaux »*.[8]

PORTEURS SECONDAIRES A ce stade de la conception, notre bâtiment est toujours aveugle ; la façade et l'ossature sont indépendantes de l'activité intérieure. Les ouvertures représentent un point faible des constructions parasismiques notamment dans les murs de contreventement qui perdent de ce fait leur utilité dans la stabilité de l'édifice. Il est conseillé de limiter la surface totale des ouvertures à moins d'un tiers de la surface du mur. Les faibles performances d'isolation thermique et d'étanchéité à l'air des fenêtres au Moyen Âge ont limité naturellement la surface des fenêtres sauf dans certain cas exceptionnels comme la maison Kammerzell à Strasbourg datée de 1589.

Ces ouvertures sont alors délimitées par une structure secondaire. Cette dernière subdivise les panneaux auparavant définis en trois parties. Deux trumeaux 'pleins' contreventés, bornés par un poteau principal, deux sablières et un montant de fenêtre sont séparés par une baie comprenant la ou les ouvertures, baie elle-même délimitée par deux poteaux d'huisserie (montants des fenêtres) et deux solives. Afin d'assurer une continuité du système mécanique ces baies sont complétées par un simple linteau dans la cas d'une porte, et d'un linteau complété par un appui dans le cas d'une fenêtre ; elles reçoivent ainsi un encadrement rigide. Ces baies perdent néanmoins tout rôle de contreventement, elles ne sont plus que décoration. On peut donc en conclure que les multiples croix de St André ou autres chaises curules *(fig. 19 et 20)* ont un rôle purement décoratif et ne participent



19. Allège au motif de chaise curule



20. Allège au motif de chaise curule



21. Allège décorative sculptée sous la fenêtre de la *'Stube'*

en aucun cas à la statique du bâtiment. Cette absence de rôle statique est également marquée par l'ornementation de certains hourdis en bois sculpté sous la baie vitrée de la pièce du séjour *(fig. 21).* Il en va de même pour les entretoises au nombre variant de trois à cinq qui séparent horizontalement les panneaux.

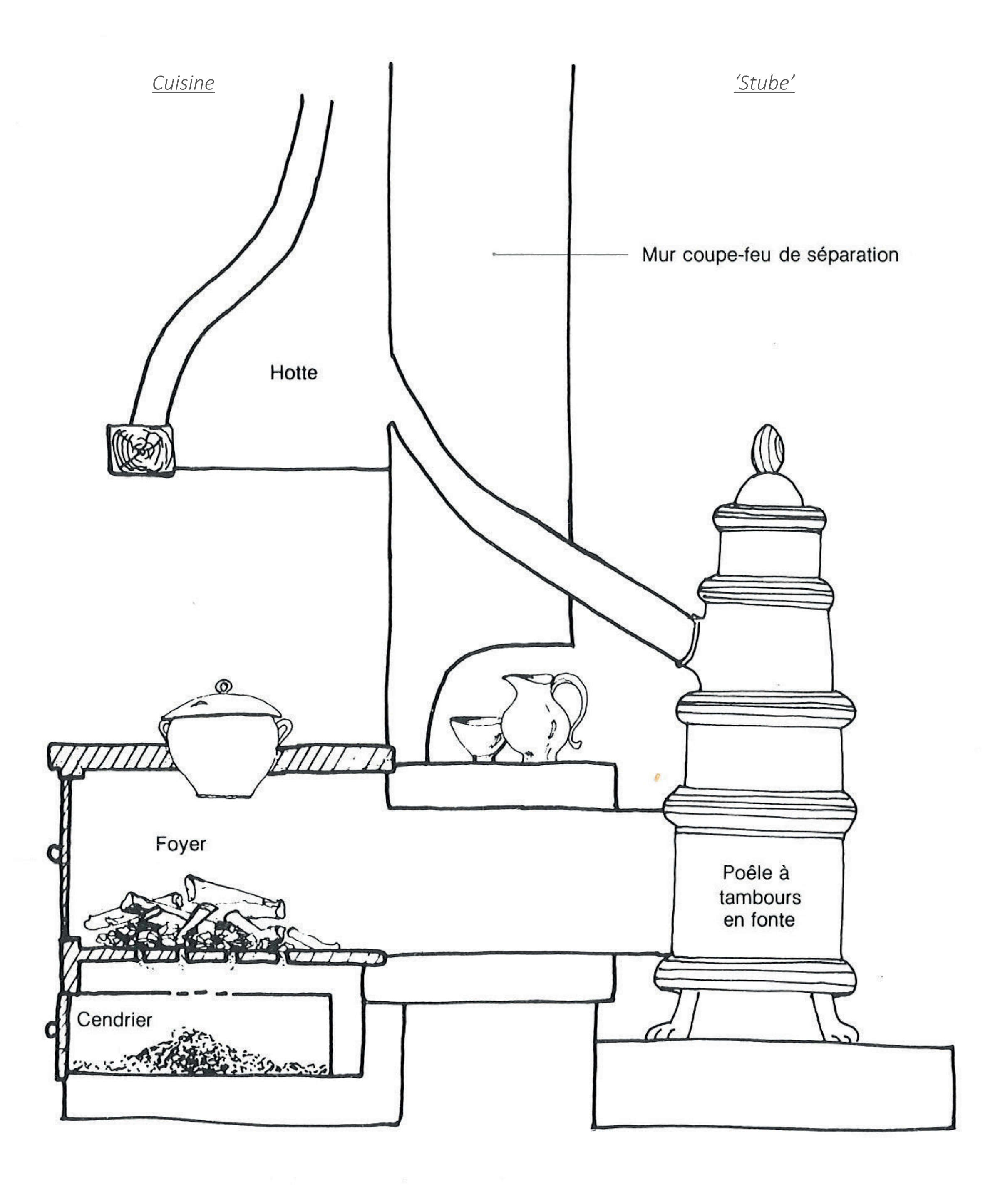
Les poteaux principaux, leur contreventement et les poteaux d'huisserie définissent ainsi les éléments porteurs d'une construction à colombage et leur agencement vertical. La présence d'un plancher rigide autorise le charpentier à prendre certaines libertés de construction quant à la superposition des trumeaux contreventés. En effet, le plancher rigide peut assurer la transmission des charges entre les éléments de contreventement non superposés de deux niveaux successifs ; une rigidité comparable des étages est tout de même à conserver, *« par conséquent, sauf cas particulier, ni le nombre, ni la nature de contreventement ne devrait varier sensiblement d'un étage à l'autre ».*[9]

DU TORCHIS A LA BRIQUE S'agissant d'un système porteur à ossature, la construction à colombage nécessite un remplissage, un hourdis. Comme vu précédemment ce remplissage est toujours issu d'un dérivé de la terre soit sous forme de torchis et ses différents supports, soit autoportant par l'utilisation de la brique. De prime à bord, le torchis n'a comme unique fonction que le rôle de combler les vides de la charpente, du plancher ou d'un pan de bois. Un regard plus long sur ces matériaux fait néanmoins ressortir une synergie entre les matériaux de remplissage et l'ossature porteuse de l'édifice assurant la stabilité de ce dernier lors d'un séisme.

Tout d'abord le torchis. Ce terme est défini comme un mortier de terre grasse et de paille hachée, servant au remplissage des pans de bois. La technique du torchis nécessite alors deux composants, un support et le torchis en tant que tel. Ce palançon, au travers des différentes variantes de mise en œuvre, se fabrique à partir de branchage de bois tendres (par ex. châtaigner, noisetier), plus tendre que la structure elle-même et donc sujet à la même déformation qu'elle. *« Dans le torchis la terre mise en œuvre est naturelle et ne reçoit d'autres adjuvants que naturels. Elle garde donc ses qualités de souplesse [et] de résistance mécanique notamment en cas de secousse sismique [.. en] s'adaptant aux déformations du substrat ».*[10] Le duo palançon/terre crée ainsi un panneau ductile se déformant avec la structure tout en dissipant les efforts de cisaillement et de torsion limitant ainsi la déformation de l'ossature.

Dans le cas d'utilisation de la brique de terre cuite ou de terre crue comme matériau de remplissage, il s'agira d'un hourdis en maçonnerie. Un mur en maçonnerie résiste, de par ses caractéristiques mécaniques intrinsèques, aux charges horizontales de compressions (son poids propre) et de cisaillements (secousses sismiques) dans leur plan. Ces panneaux rigides sont donc autoportants. Ills ne nécessitent plus aucun support et aucune subdivision horizontale, les entretoises sont donc obsolètes. Les contreventements en bois de l'ossature en revanche restent indispensables pour éviter de trop grandes déformations quotidiennes, ces panneaux ne jouant toujours aucun rôle structurel. En outre, la rigidité supérieure de ces 'cloisons' impacterait la déformabilité des poteaux et de ce fait en réduirait leur ductilité. En revanche tout comme le torchis, ces parois rigides gardent leur résistance mécanique et s'adaptent ainsi aux déformations du squelette. Le comportement statique d'une construction à colombage, s'apparente alors à celle d'une construction monolithique. La désolidarisation de la maçonnerie et de l'ossature est assurée par un joint en mortier de terre de forte épaisseur (env. 2-3 cm) permettant le déplacement relatif des poteaux par rapport aux maçonneries.

• *En résumé*, les maisons à colombage alsaciennes sont composées de trois pans de bois (un pan incliné, un pan horizontal, un plan vertical) et d'un remplissage. Le caractère parasismique de ces habitations vernaculaires est assuré par un bon assemblage mécanique de ces quatre composants. Ces derniers ont chacun un rôle précis dans la stabilité de l'ensemble. Le pan vertical assure la transmission des charges verticales et horizontales aux fondations, les plans horizontaux et inclinés transmettent les charges sismiques horizontales sur les éléments de contreventement vertical et les hourdis assurent la ductilité de l'ensemble lors d'un séisme.



22. Chauffage de la *'Stube'* par la cuisine

A L'ABRI DU TEMPS

La région culturelle Alsace a connu un grand essor démographique à partir XIIIe siècle pour devenir aux alentours des années 1350 une des régions les plus urbanisées du Moyen Âge avec pas moins de soixante-dix communes bénéficiant de l'appellation et du statut de ville.[11] Cette époque coïncide également avec l'apparition des premières maisons en pan de bois, première maison à colombage datée du milieu du XIIIe siècle. La présence actuelle de ces vestiges dans les centres villes historiques témoigne d'une construction durable à l'abri du temps.

A L'ABRI DU FEU Le feu peut aisément être considéré comme l'ennemi naturel du bois, comme en témoignent les dévastations engendrées par les nombreux feux de forêts de l'été 2017. Cependant dire que le bois ne résiste pas au feu est également faux ; le bois massif possède une grande résistance au feu. En effet, lors de la combustion du bois, une couche de carbone se forme sur la surface du bois isolant les parties non brulées de la chaleur dégagée par les flammes. La vitesse de carbonisation se voit donc très fortement réduite pour arriver à une constance d'environ sept millimètres par minute et par face. Après une heure l'élément bois aura approximativement été brulé sur une profondeur de quarante-deux millimètres, mais n'aura perdu que 10 à 15 % de ses performances totales malgré les fortes chaleurs. - Par comparaison, l'acier ne voit pas sa section diminuer, mais son efficacité structurelle chute de 60% si soumis à une chaleur de plus de 600°C et devient nulle à partir de 1200°C.[12] - Ce maintient des performances statiques permet d'éviter l'effondrement des éléments porteurs principaux en cas d'incendie. Les constructions à colombage ne sont pas différentes. Ces dernières ne rendent pas la structure inflammable mais s'efforcent d'augmenter la capacité intrinsèque du bois à restreindre l'incendie permettant ainsi une évacuation 'sereine' des habitants. Cet accroissement de résistance au feu peut être retracé, d'une part jusqu'à la conception de l'édifice et d'autre part à son système constructif et ses matériaux.

La maison traditionnelle alsacienne dispose uniquement d'un seul véritable système de chauffage : l'âtre, un bloc cuisine massif et maçonné. Il n'est cependant pas rare de rencontrer dans la pièce de séjour principale, la *'Stube,'* un poêle à tambour en fonte ou un poêle en terre cuite vernissée, le *'Kachelofe.'* Ces poêles sont éteints ou inactifs, c'est à dire qu'ils sont exempts de tout foyer. Ils ne font que diffuser la chaleur qu'ils reçoivent eux-mêmes d'un des foyers de l'âtre par un tunnel percé dans le mur séparant la cuisine de la sale à manger. Cette cloison devient alors l'attention principale des charpentiers afin d'éloigner et de désolidariser tout élément porteur en bois de cet unique foyer et ainsi éviter au maximum un incendie. Cette tâche fut soumise au maçon. Ce dernier intervient très peu dans les maisons à colombage à l'opposé des constructions contemporaines. Il opère lors de la construction des fondations et de l'éventuel cave puis élève le mur coupe-feu de la cuisine et sa cheminée *(fig. 22).* Ces deux constructions en maçonnerie résistent au feu et permettent l'évacuation de la fumée par la toiture et protègent les boiseries du feu. Il se dresse ainsi un mur en maçonnerie solitaire dans une construction en pan de bois.

Les remplissages, de manière comparable au mur en maçonnerie, isolent également les éléments porteurs principaux. En effet, la terre est classée comme un matériau incombustible. L'ajout de fibres végétales dans le but de l'amaigrir n'affecte en aucun cas ce classement à la condition que sa masse volumique ρ reste supérieure à 1700 kg/m^3. Dans le cas, où il s'agit de mélanges plus légers, comme le torchis (ρ = 1200 kg/m^3) où la terre enrobe des fibres inflammables, ces derniers sont classés comme difficilement inflammables.[13] Les hourdis se comportent ainsi de manière passive lors d'un incendie, ils ne contribuent donc pas à la propagation des flammes. A cela s'ajoutait la pratique courante de badigeonner le bois d'une fine couche de barbotine. Cette couche de boue liquide de terre argileuse, aussi fine et anodine soit-elle, procure en cas d'incendie, tout comme la terre pour les fibres végétales, une protection en cas d'incendie contre l'inflammation et la carbonisation, et retarde ainsi une fois de plus l'effondrement de la structure.

Dans un contexte urbain dense, les flammes peuvent rapidement se propager et ravager des centres villes entiers comme ce fut le cas en 1666 pour Londres, ou plus tard en 1871 à Chicago. Ce ne sont cependant pas les



23. Avant-toits et longs débords de toiture protégeant le pignon et les murs gouttereaux de la pluie battante



24. Moulures de rejets d'eau appliquées devant la sablière



25. Sablière sculptée pour assurer les rejets d'eau

flammes la cause première des pertes humaines dans un incendie ; ce sont les fumées. Ces dernières saturent l'air et entrainent l'asphyxie des habitants. Le torchis, comme la plupart des dérivés de terre, de par son caractère difficilement inflammable et ce malgré les fibres végétales ne libèrera aucune fumée lors d'un incendie assurant ainsi un niveau d'oxygène suffisant en attendant l'évacuation du bâtiment, les secours ou l'extinction du feu.

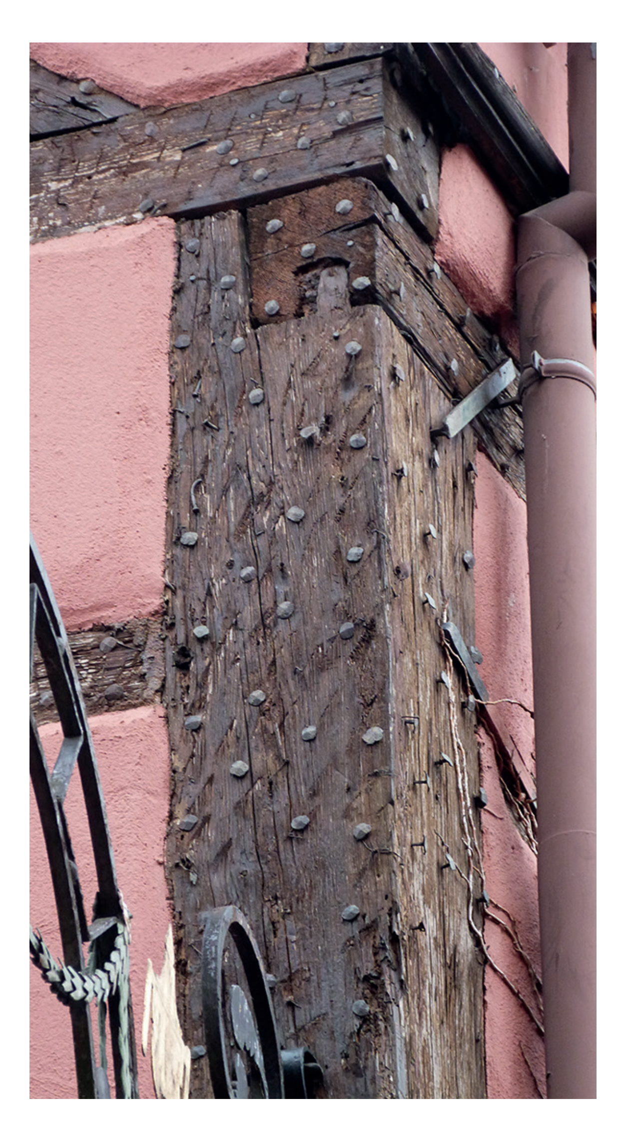
A L'ABRI DE L'EAU L'eau peut être tout aussi ravageuse que le feu, entrainant un grand nombre de dégâts dans une construction (éclatement des bois, infiltration d'eau, ...). Le terme « eau », dans le contexte présent, distingue l'eau de rejaillissement et la pluie battante.

La protection contre les eaux de rejaillissement est exclusivement assurée par le solin de pierre désolidarisant la sablière basse du sol, du terrain. Ce soubassement s'élève sur une trentaine de centimètres, dans certains cas notamment en ville sur l'ensemble du rez-de-chaussée. Un film étanche disposé entre la maçonnerie plus humide et la structure bois protège la construction des remontées capillaires. Une feuille bitumée suffirait, mais dans le cas des colombages traditionnels, on calfeutrait la sablière par un dessous de mortier.[14]

Se protéger de la pluie battante s'avère plus compliqué et aucune méthode de protection ne faisait l'unanimité. En effet, les maisons à colombage étaient de manières très diverses confrontées à la pluie battante. La première et sans doute la plus importante était la présence ou non d'une structure bois apparente ou non. Le bois est imperméable dans le sens de ses fibres grâce à sa protection en surface par les fibres en cellulose qui s'alignent avec le ruissellement de l'eau ; les poutres verticales sont donc épargnées et sans crainte. Au contraire de tous les éléments horizontaux (sablières, entretoises, appuis de fenêtres) et en moindre mesure les éléments diagonaux. Ces constructions à ossature apparente faisaient alors appel à une des trois solutions suivantes : un traitement de surface, des moulures de rejets d'eau ou l'ajout d'un avant-toit à chaque étage. La dernière des solutions restant la méthode la moins courante de par son opulence en façade *(fig. 23).* La méthode la plus courante fut celle du traitement de la face exposée par un badigeon à base d'huile et de lin obturant fentes et pores, donnant ainsi une résistance à l'infiltration de l'eau. Les moulures malgré leur nature constructive étaient plus dédiées au décor et non à la protection des boiseries horizontales. - il n'est pas rare aujourd'hui de constater une zinguerie protégeant l'ensemble sablières/moulures *(fig. 24 et 25).* -

En revanche, recouvrir l'ensemble du bâti, de la façade, d'une couche d'enduit assure une étanchéité à l'eau idéale malgré une expression architecturale plus 'plate'. En effet, cet enduit à base de chaux hydraulique, d'anas de lin et d'étoupe de chanvre appliqué en deux couches, une couche de support et une couche de finition, devient imperméable après séchage notamment grâce aux faibles dimensions de ses granulats. La stabilité dépend comme pour le torchis de l'accroche sur le support, ici les hourdis (brique ou torchis lui même) et l'ossature bois. Si la surface est trop lisse, on la rend plus rugueuse à l'aide d'une griffe ou d'un planche à clous. Certains colombages portent encore les marques de ce processus, des marquages prenant la forme d'un maillage sur les faces extérieures de l'ossature bois *(fig. 26,27 et 28).* Cela signifie également que l'ossature n'était à l'origine pas dédiée à être apparente. Ces mêmes poutres peuvent également porter des marques de clous, ces marques témoignent de la présence préalable d'un maillage métallique ou végétal comme support d'enduit. Cette technique a souvent été utilisée pour couvrir une ossature préalablement enduite ou alors certaines pièces de bois réutilisées. On peut donc en conclure que l'enduit extérieur est le seul acteur dans la protection contre la pluie des constructions à colombage. Son entretien s'avère donc capital.

A L'ABRI DE L'HUMIDITE En complément de la pluie battante et de l'eau de jaillissement, l'eau est à la source du dernier ennemi du bois, l'humidité. Cette dernière est, à proprement dire, inoffensive - Venise est construite sur des pilotis en bois constamment submergés et n'est pas près de s'écrouler - ses conséquences, tout le contraire. L'humidité, ou du moins une humidité trop élevée pendant une durée prolongée, peut entrainer moisissures, pourrissements, formation de champignons et rend le bois plus vulnérable aux attaques d'insectes. En effet, si le taux d'humidité dépasse les 18%, le bois s'attendrit et rend la progression des larves beaucoup plus facile. Cette caractéristique naturelle du bois entraîne deux prérequis pour une construction en ossature bois pérenne ; il doit soit être constamment immergé ou être constamment ventilé. Les constructions à colombage peuvent être



26. Vestige des accroches d'un grillage sur la façade



27. Marques de ciseaux à bois facilitant l'accroche du torchis



28. Chevilles de support au torchis

catégorisées dans la lignée de celles qui assurent une ventilation naturelle constante des éléments porteurs en bois.

Ce rôle est une fois de plus endossé par le matériau de remplissage principal, la terre. Cette dernière permet au mur de perspirer, c'est à dire d'absorber l'humidité et de la rediffuser vers l'extérieur. En effet, les dérivés à base de terre utilisée comme remplissage (torchis, 'terre allégée', briques) ont tous une très faible résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Ce coefficient de diffusion à la vapeur d'eau µ reste inférieur à 10, pour comparaison celui du hêtre est aux alentours de 370. De façon complémentaire, ces dérivés terre ont une grande capacité d'absorption de l'eau avec un coefficient d'absorption w de 5 à 10 $kg/m^2h^{0.5}$ pour une 'terre allégée' (ρ = 800-1200 kg/m^3) et de 10 à 30 $kg/m^2/h^{0.5}$ pour des briques pleines ou torchis (ρ = 1700 kg/m^3). Le béton armé, connu pour être un matériau non absorbant a, lui, un coefficient w inférieur à 3 $kg/m^2/h^{0.5}$.

Ces caractéristiques d'absorption et de diffusion sont mises en avant dans les constructions à colombage en couplant ce remplissage 'sec' avec une structure 'humide.' *« D'après les mesures effectuées jusqu'à aujourd'hui, on peut présupposer que pour la terre allégée - et les autres matériaux de terre - une teneur en eau normale rapportée au volume de* w_v *= 0,3% ».*[15] On peut donc conclure que la grande capillarité du bois et sa fable teneur en eau hygroscopique lui permet de soutirer l'humidité des pans de bois et de ne proposer qu'une faible opposition à sa rediffusion vers l'extérieur. Cette 'respiration naturelle' assure alors une humidité rarement supérieure à 15%. L'absence de pare-vapeur était donc de bonne augure ; ce dernier aurait en effet provoqué une condensation non souhaitée sur sa face la plus froide.

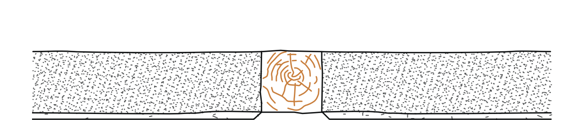
• *En résumé,* la durabilité des constructions en pans de bois peut être expliquée par deux facteurs principaux. Le premier facteur à mentionner est la capacité de ces constructions à comprendre les dangers et les caractéristiques propres à chaque matériau et situation et d'y trouver des solutions par une conception audacieuse de l'habitat. L'exemple le plus significatif restera probablement le mur coupe-feu entre la cuisine et le séjour. Le deuxième facteur est leur capacité à combiner des matériaux hétérogènes qui se protègent mutuellement. La terre protège l'ensemble de la construction contre les incendies, la pluie et l'humidité. Le solin en pierre protège les façades des eaux de jaillissement et des remontées capillaires. Les badigeons de terre ou d'huile terminent cet inventaire de matériaux de protection en assurant l'étanchéité à l'eau des colombages apparents.

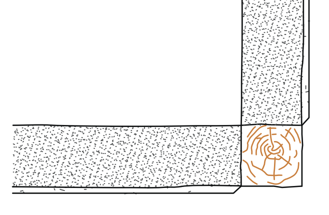
Matériaux	*Masse volumique* ρ $[kg/m^3]$	*Absorption d'eau* w $[kg/m^2h^{0.5}]$
Torchis	1200 - 1400	5 *à* 10
Brique pleine	1800	10 *à* 30
Béton lourd	2400	0 *à* 3

29. Absorpion d'eau du torchis, comparaison avec d'autres matériaux courants actuels

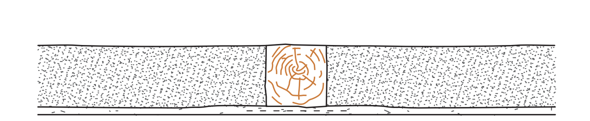
	Masse volumique ρ [kg/m³]	Conductivité thermique λ [W/mK]
Matériaux		
Torchis	1200	0,47
	1400	0,59
En comparaison		
Terre allégée	600	0,17
	1000	0,35
Pisé	2000	1,13
Béton lourd	2400	2,10
Brique pleine	1800	0,81
Bois résineux	600	0,14
Laine minérale	80	0,04

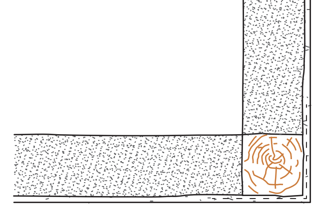
30. Conductivité thermique λ du torchis, comparaison avec d'autres matériaux courants actuels





31. Bois apparent, remplissage enduit





32. Bois non apparent, support d'enduit fixé sur le bois

UN HABITAT PASSIF

Un choix et une mise en œuvre audacieuse des matériaux offre à l'ossature bois un caractère d'orfèvrerie locale à l'abri du temps. Néanmoins ces vestiges du passé ne sont pas uniquement des témoins d'une riche tradition constructive locale mais également d'un savoir vivre, d'un mode de vie. Ce dernier article va donc conclure cette première série sur les maisons traditionnelles alsaciennes en s'intéressant au climat intérieur et au confort thermique procuré par la synergie des deux matériaux terre et bois.

UNE PEAU ISOLANTE Une fréquente analogie est faite entre les bâtiments et le corps humain et non sans raison ; l'ossature d'un bâtiment, en fait son squelette, et la façade, en fait sa peau. Le rôle de cette dernière peut alors en être facilement déduit : il s'agit de limiter les transferts de chaleur entre un milieu intérieur tempéré et l'air extérieur. Cette isolation thermique assure ainsi une maitrise des énergies de chauffage et une température de surface des parois agréable. Cette capacité d'un mur à procurer une résistance thermique R est inversement proportionnelle à sa conductivité thermique λ. Ce coefficient de conductivité thermique étant étroitement lié à la masse volumique du matériau, on peut en conclure que les matériaux 'légers' sont de bons isolants au contraire des matériaux 'lourds.'

L'opinion commune que les bonnes performances énergétiques des maisons à colombage soient liées au remplissage en terre n'est donc pas tout à fait correcte. Le torchis est un mélange de terre argileuse et d'agrégats poreux comme la paille, mais sa masse volumique ρ, aux alentours de 1200 kg/m^3,[16] reste élevée ; c'est donc un matériau relativement 'lourd.' Par opposition, le bois est un matériau 'léger,' avec une masse volumique ρ de 600 kg/m^3 pour les essences les plus tendres et de 800 kg/m^3 pour les essences les plus dures.[17] Ce rapport de force se retrouve dans le coefficient de conductivité thermique avec des valeurs plus faibles pour le bois comparé à celui du torchis, respectivement 0,21 W/m.K pour les bois durs (chêne, hêtre), 0,14 W/m.K pour les bois tendres (épicéa, sapin) et 0,47 W/m.K pour le torchis. Contre tout attente, le torchis est alors le matériau le moins isolant de la façade si l'on fait abstraction des fenêtres. Un remplissage de torchis procure tout de même trois fois la résistance offerte par un même remplissage en pierre (λ=1,5 W/m.K) ou par un mur en béton armé (λ=2,1 W/m.K).[18] La grande diversité des essences de bois et la préparation manuelle du torchis pouvant influencer sa masse volumique rend compliqué un calcul de la résistance thermique globale de l'édifice. Une estimation approximative est cependant tout de même possible.

Dans une maison à colombage, la résistance thermique globale, R_{totale}, d'une paroi ou d'une cloison correspond à la somme des résistances thermiques de l'ossature bois R_{bois} et des hourdis $R_{hourdis}$, chaque matériau pondéré par son rapport de surface. Pour une épaisseur *e* de cloison de 16 cm et un rapport ossature bois/hourdis d'un tiers, on obtient donc une résistance thermique totale :

$$R_{totale} = 1/3\ R_{bois} + 2/3\ R_{hourdis} \qquad \text{avec} \qquad R = \sum e / \lambda\ [m^2K/W]$$

donc :

$$R_{bois} = 0,16 / 0,21 = 0,76\ m^2K/W$$

$$R_{hourdis} = 0,16 / 0,47 = 0,34\ m^2K/W$$

soit :

$$R_{totale} = 1/3 \,.\, 0,76 + 2/3 \,.\, 0,34 = 0,48\ m^2K\ W$$



33. Albert Anker, Sonntagnachmittag *('Le dimanche après-midi')* (1861).

Le bois et le torchis se partagent ainsi équitablement le rôle de l'isolation thermique du bâtiment malgré la surface occupée par les hourdis en façade plus élevée que celle occupée par l'ossature.

L'enduit de protection, principal garant de l'invulnérabilité des pans de bois aux intempéries, joue également un rôle isolant, aussi petit soit-il. En effet, ce dernier, mélange de terre, de chaux et de purin, permet d'accroître la résistance thermique de l'enveloppe de 5 à 7 % quand appliqué respectivement uniquement sur les hourdis *(fig.31)* ou également sur l'ossature bois *(fig. 32).*

$$R_{enduit} = 0{,}03 / 0{,}87 = 0{,}035 \ m^2K/W$$

$$R_{tot. + enduit\ hourdis} = 1/3 \ . \ 0{,}76 + 2/3 \ . \ 0{,}375 = 0{,}503 \ m^2K \ W$$

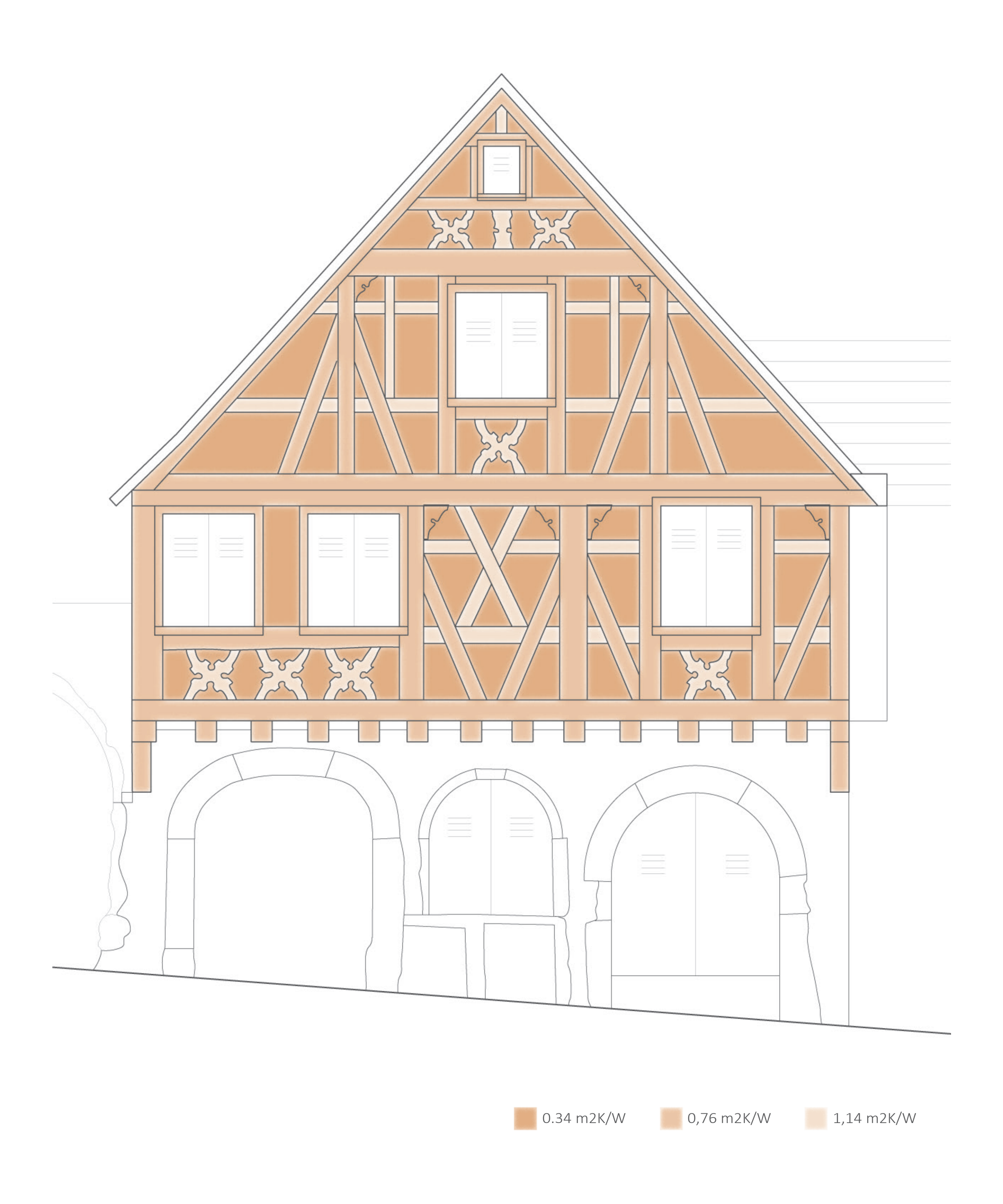
$$R_{tot. + enduit\ façade} = 1/3 \ . \ 0{,}795 + 2/3 \ . \ 0{,}375 = 0{,}515 \ m^2K \ W$$

Ainsi malgré une expression architecturale pouvant apparaitre homogène dans la situation où l'ensemble de la façade est enduite, ses propriétés thermiques sont très hétérogènes et ce au sein même de l'ossature bois par la présence de différentes essences de bois. Cette hétérogénéité *(fig. 34)* n'influence que très peu les bienfaits d'une isolation thermique sur le climat intérieur : le maintient d'une température de confort à l'intérieur du bâtiment.

UNE MAISON QUI RAYONNE L'isolation procurée par le duo terre/bois amorti les fluctuations de chaleur mais ne les annule pas pour autant. Un air extérieur chaud la journée correspondra à un air chaud intérieur et un air extérieur frais occasionnera un air frais à l'intérieur. Afin d'assurer un bon climat intérieur *« cette variation de température ne doit être perceptible à l'intérieur qu'avec un déphasage de six à dix heures ».*[19] Cet important décalage dans le transfert de chaleur dépend exclusivement de l'amortissement, c'est dire de la vitesse et de l'intensité avec lesquelles les variations de température extérieure sont perceptibles à la surface interne du mur. Le bon amortissement des maisons à colombage est obtenu, d'une part, par une isolation thermique comme vue précédemment et, d'autre part, une accumulation thermique.

Cette accumulation thermique dépend surtout de la masse volumique des matériaux utilisés. Ainsi le torchis (ρ=1200 kg/m^3) est un bon accumulateur de chaleur. La paille, principal composant du torchis, et le bois sont eux également dotés d'une grande inertie thermique ; ils participent donc également à l'accumulation de chaleur. Ces matériaux équilibrent leur température à un niveau moyen lors de fortes variations de température de l'air. Ils stockent ainsi la chaleur ou la fraîcheur pour la rediffuser plus tard le jour, respectivement la nuit, assurant une faible amplitude des températures tout au long de la journée. Les maisons alsaciennes ont particulièrement exploité ce principe d'inertie thermique pour leur système de chauffage : le *'Kachelofe'*. Il s'agit ici d'un simple poêle en terre cuite vernissée trouvant sa place dans un coin de la pièce de séjour dans le prolongement de l'âtre. Le *'Kachelofe'* accumule la chaleur du foyer de la cuisine et la stocke dans ses parois en terre avant de la rediffuser et cela encore bien longtemps par l'intermédiaire des tuiles en terre cuites ou des faïences émaillées ornant les faces extérieures de ce mobilier de maison *(fig. 33).*

Cette grande inertie thermique des murs permet également d'assurer une température de surface intérieure des parois agréable, température similaire à celle de la température de l'air ambiant de la pièce. Ce confort au 'toucher' joue un rôle primordial dans la sensation de bien-être ; ce qui explique le soin particulier apporté à la géométrie des poêles afin d'y incorporer une multitude d'assises. Malgré l'ensemble de ces bienfaits, la grande inertie thermique et la grande effusivité thermique *b* du bois et du torchis (le cas échéant, la brique) ne permet pas de réchauffer ou de refroidir rapidement une pièce. Les parois sont elles aussi chauffées avec l'air de la pièce et ainsi le volume global soumis à un changement de température est supérieur au seul volume de la pièce. Un mur en pierre, aujourd'hui en béton, est beaucoup plus passif dans l'équilibre de la température entre paroi et air, il resterait alors 'froid' pendant que la température de l'air augmente, respectivement diminue. *« Un mur avec un grand effet de stockage de chaleur provoque un important retard dans le transfert de chaleur (déphasage), une bonne paroi isolante attenue les fluctuations de température (amortissement d'amplitude)».*[20]



34. Résistance thermique R d'un pignon en colombage

UNE MAISON QUI RESPIRE Le confort thermique d'une pièce, d'un habitat est bien entendu impacté par la température de l'air et des parois, mais également par une autre grandeur physique souvent négligée : la teneur en humidité de l'air. Elle est la cause d'une multitude de nuisances. En effet, si l'humidité d'une pièce est inférieure à 40%, l'air est considéré comme 'sec.' Ce cas de figure augmente la susceptibilité du corps humain aux refroidissements. A l'opposé, si l'humidité est supérieure à 70%, l'air est considéré comme 'humide.' Cette situation entrainerait une réduction de l'apport d'oxygène dans le sang ainsi que la formation de moisissures.

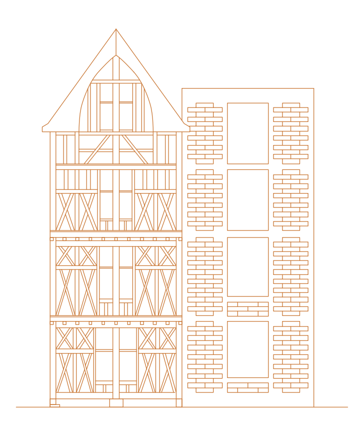
Cette humidité de l'espace intérieur d'habitation est régulée de manière similaire à l'humidité dans les parois, la vapeur d'eau est absorbée et diffusée au travers des hourdis. On dit alors que la façade respire, à tort. La respiration s'applique aux êtres vivants, c'est *« une fonction biologique par laquelle l'organisme absorbe l'oxygène et le gaz carbonique »*.[21] Ici, le remplissage des façades en torchis ou en briques participe à l'échange de vapeur d'eau entre des milieux au travers d'une surface, la cloison. Il n'y a aucun échange d'air, les hourdis restent imperméables à l'air et n'assurent en aucun cas le renouvellement de l'air. Les murs périphériques des maisons à colombage n'ont pas une fonction respiratoire mais bien une fonction de perspiration, de transfert de vapeur d'eau. Cette propriété typique aux matériaux à base de terre permet de maintenir une humidité de l'air majoritairement comprise entre 40 et 70% tout au long de l'année.

Ce transfert est assuré uniquement par le matériau 'sec' d'une construction à colombage, le torchis. Le bois étant apparent à l'extérieur favorise tout au plus une augmentation continue de l'humidité ambiante. Cette propriété physique est la conséquence directe de son faible coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ entre 5 et 10 et sa grande capillarité *(cf. p.43).*

• *En résumé,* les matériaux de construction se complètent afin d'offrir aux habitants un confort thermique élémentaire. L'abandon des murs massifs en bois et leur bonne isolation thermique marque l'arrivée d'un matériau d'isolation, le torchis. Ce n'est pas pour autant que la structure ne participe pas aux performances de résistance thermique de la peau du bâtiment, elle en est responsable de la moitié. Les matériaux de l'ossature et des remplissages se comportent de manière similaire, ils se complètent. Il en va de même dans la régulation des variations de température le long d'une journée, où les deux matériaux font preuve d'une grande inertie thermique. Seul le contrôle de l'humidité de l'air voit la paire se dissoudre ; le bois étant très sensible à l'humidité, seul le torchis joue le rôle de régulateur des échanges de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur.

Matériaux	*Masse volumique* ρ *[kg/m³]*	*Résistance à la diffusion de vapeur d'eau* μ *[W/mK]*
Torchis	1200 - 1400	5 *à* 10
Brique pleine	1800	10 *à* 30
Béton lourd	2400	70 *à* 150

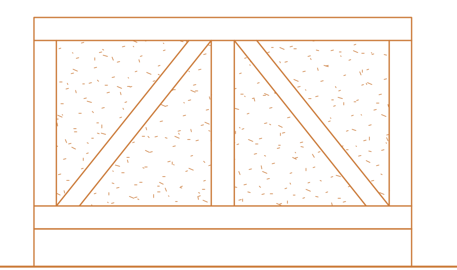
35. Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ du torchis, comparaison avec d'autres matériaux courants actuels



LES INNOVATIONS D’AUJOURD’HUI

- études de cas II -

La ‘terre allégée’
La maçonnerie chaînée
‘Conceptos Plasticos’
Le pisé



Terre allégée

HISTOIRE La construction en ‘terre allégée’ caractérise un système de construction développé en Allemagne entre les deux guerres d’après la technique du torchis traditionnel puis repris dans les années 1970 après le crash pétrolier et la prise de conscience qui s’en suivit de notre dépendance envers les énergies fossiles. [22]



36a. Façade en terre allegée non protégée durant la construction

SYSTEME Ce système de construction est caractérisé par une ossature, généralement en bois, et un remplissage en 'terre allégée.' Plus que de définir le nom de ce système de construction, le terme 'terre allégée' désigne l'ensemble des mélanges de terre et de paille, ou d'autres composants légers, ayant une masse volumique ρ inférieure à 1200 kg/m^3 indépendamment de leur mise en œuvre. Ce remplissage, de par sa faible masse volumique, perd l'ensemble de ses propriétés mécaniques au dépend d'une grande qualité en matière d'isolation thermique avec un coefficient de conductivité thermique λ allant de 0,47 W/mK - similaire à celui du torchis - jusqu'à 0,1 W/mK pour les mélanges les plus légers (ρ = 300 kg/m^3). Selon les éléments de la structure en bois à remplir et l'organisation du chantier, cette 'terre allégée' peut être travaillée à 'sec' par l'intermédiaire de briques ou de blocs, panneaux de plus ou moins grande dimensions ou travaillée 'humide' en la comprimant légèrement dans des coffrages ou en l'appliquant selon la méthode traditionnelle sur palançons de bois souples. Un enduit extérieur de terre vient sceller les surfaces intérieures et extérieures assurant l'étanchéité à l'air des façades.



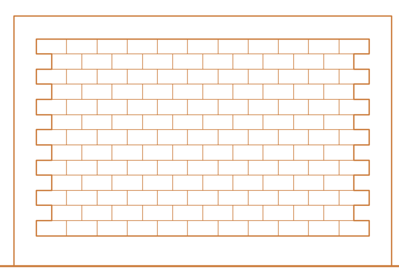
36b. Plancher en fusées de terre allégée



36c. Mur en briques de terre allégée, empilées sur une couche de mortier de terre



36d. Darmstadt, Allemagne. Atelier d’artiste (1996)



Maçonnerie chaînée

HISTOIRE Les constructions en maçonnerie chaînée sont des constructions fréquentes dans les zones à forte activité sismique tel que la Slovénie et le Mexique, où respectivement 40% et 60 % des logements sont construits selon cette technique. Pour la plupart des pays, cette pratique n'est pas très ancienne, une trentaine d'années tout au plus ; seul le Chili semble avoir une histoire plus longue avec la pratique de la maçonnerie chaînée remontant aux années 1930. [23]



37a. Interface colonne/mur en forme de dents de scie

SYSTEME Les constructions en maçonnerie chaînée, également appelée maçonnerie confinée, sont composées de murs en maçonnerie non armée et de renforcements horizontaux et verticaux en béton armé construits sur les quatre côtés du mur. Ces éléments de confinement, poteaux et poutres en béton armé, forment un lien entre les différents pans de murs en maçonnerie. Ces derniers, de section rectangulaire et d'épaisseur de la paroi porteuse, sont coulés sur place une fois les murs en maçonnerie érigés afin d'en assurer leur liaison mécanique par le biais d'une dentelure périphérique. Les diverses ouvertures bénéficient également d'un chaînage par éléments linéaires en béton armé les liant à la structure principale. Le système constructif des planchers suit habituellement la même logique en combinant des poutres en béton armé et un remplissage en maçonnerie. Il est néanmoins possible de le remplacer par une simple dalle en béton armé. A l'opposé, une charpente en bois traditionnelle est utilisée comme structure pour les toits inclinés ; dans le cas des toits plats, le même système constructif que celui des planchers est employé.



37b. Népal. Exemple d'une nouvelle construction parasismique, Build Change (2016-17)



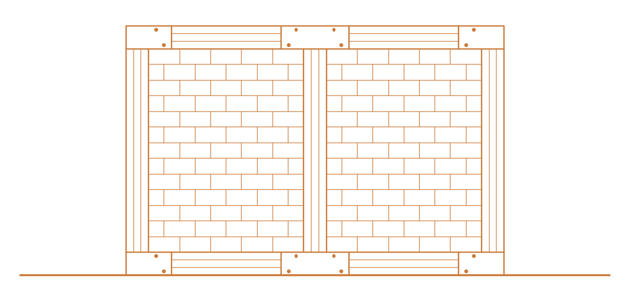
37c. Coffrage d'angle



37d. Pakistan. Maison de démonstration en maçonnerie chaînée



37e. Mise en oeuvre des murs en maçonnerie avec les réservation pour les éléments en béton armé et leurs armatures



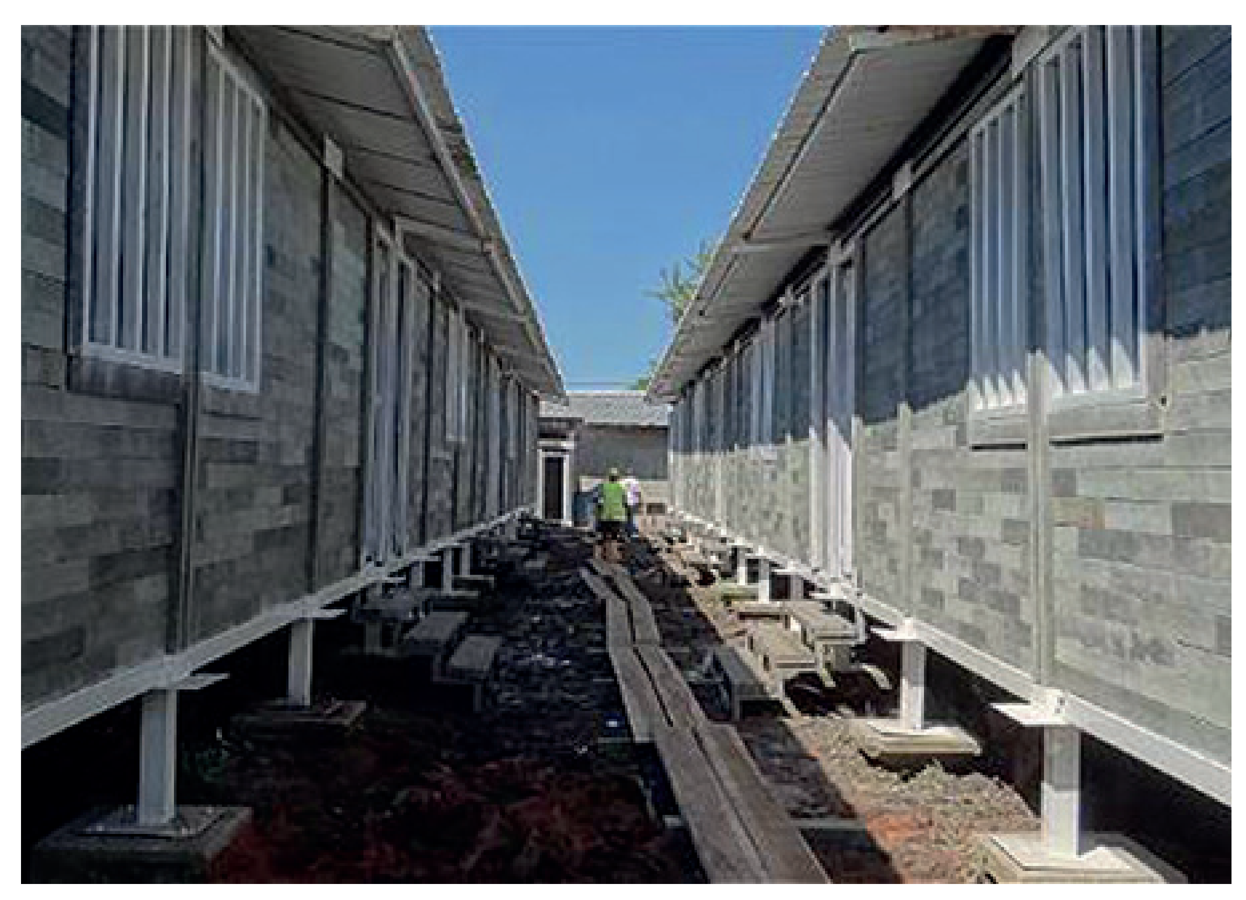
'Conceptos Plasticos'

HISTOIRE L'initiative 'Conceptos plasticos' a vu le jour par la volonté d'Osacar Mendez de fournir un abri décent aux sans-abris tout en réduisant l'impact environnemental du plastique en le réutilisant dans la construction de ces derniers. En 2010, accompagné de quatre autres collègues, il fonda la compagnie *'Conceptos Plasticos'* qui transforme les déchets plastiques et de caoutchouc en matériaux de construction, et les utilise pour construire des maisons pour ceux qui en ont besoin, à travers la Colombie. [24]



38a. Guapi,Colombie. Abri temporaire pour 42 familles déplacées par un conflit armé, Conceptos Plásticos (2015)

SYSTEME Cette initiative socio-économique et environnementale aboutit alors par le biais de cette petite entreprise locale à un brevet d'un système de construction parasismique. Le système se compose de deux éléments, de cloisons rigides et de piliers tous deux en plastique recyclé. Les cloisons sont montées à l'aide de briques en plastique recyclé, extrudées et assemblées entre elles sans liant par un assemblage autobloquant par pression de par leur forme cannelée. Similaire à la maçonnerie chaînée, les éléments porteurs verticaux et horizontaux sont liés à ces cloisons par le biais du même assemblage autobloquant. On est donc en présence d'une construction de type 'LEGO' qui confère à l'édifice un comportement statique monolithique résistant au feu par ses matériaux et aux séismes par leur assemblage. Des liaisons métalliques sont ajoutées en pied et en tête des nombreux poteaux afin d'en assurer leur connexion mécanique. Les ouvertures sont liées à la 'carcasse rigide' par un cadre afin d'éviter l'effondrement en cas de secousse sismique. Le plastique recyclé est le seul et unique matériau de gros œuvre dans la construction, des éléments linéaires assemblés avec la panne faîtière forment ainsi la charpente de toiture.



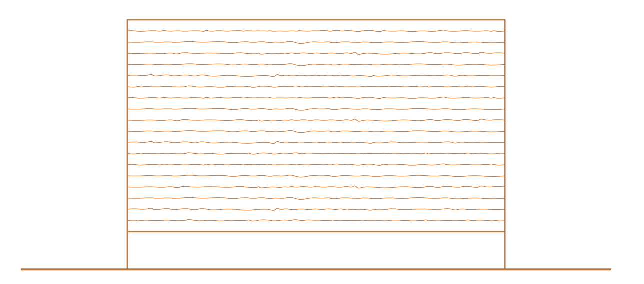
38b. Rue intérieure du quartier temporaire



38c. Contraste entre la nature sauvage et les constructions temporaires



38d. Mise en oeuvre des briques de plastique



Pisé

HISTOIRE Le terme pisé, en allemand *'Stampflehmbau'* et en anglais *'rammed earth,'* caractérise une technique de construction en mur massif de terre porteur utilisée depuis l'antiquité. Elle fut continuellement utilisée à travers les siècles par les égyptiens puis repris par les romains, les moines bouddhistes ou encore les empereurs chinois. [25]



39a. Laufen, Suisse. Kräuterzentrum Ricola, Herzog et de Meuron (2014)

SYSTEME Le terme pisé ne décrit cependant pas uniquement une technique de mise en œuvre mais également, tout comme le torchis ou la 'terre allégée,' un mélange de terre et d'agrégats minéraux et végétaux dont la masse volumique ρ est comprise entre 1700 et 2200 kg/m^3. Cette importante densité en fait le plus lourd des matériaux de construction en terre et lui vaut souvent la comparaison avec le béton, sa mise en œuvre d'autant plus. Un mur en pisé peut être monté selon une mise en œuvre humide, c'est à dire in-situ, mais également depuis peu monté à sec, c'est à dire préfabriqué. Qu'il s'agisse alors d'un pan de mur entier ou d'un bloc de pisé, le processus de fabrication est le même : le mélange terre-argile humide est versé dans un coffrage par couche de 10 à 15 cm avant d'être tassé manuellement ou mécaniquement ceci lui donnant, une fois décoffré, une ornementation naturelle par la succession de bandes horizontales en terre de couleurs diverses. Cette forte densité confère au pisé, mur ou maçonnerie, une résistance à la compression de 2 N/mm^2 en dépit de sa conductivité thermique λ de 1,13 W/mK. De par son coefficient de conductivité thermique élevé, une épaisseur d'isolation thermique est fréquemment appliquée sur les murs périphériques dans le cas de pièces chauffées. Selon la convenance de tout un chacun, les façades peuvent ensuite être enduites ou laissées apparentes.



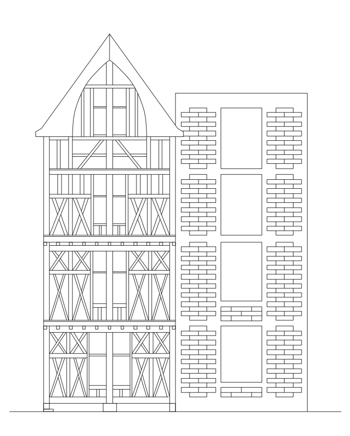
39b. Retouche des joints avec un mortier de terre



39c. Mise en oeuvre des éléments préfabriqués en pisé

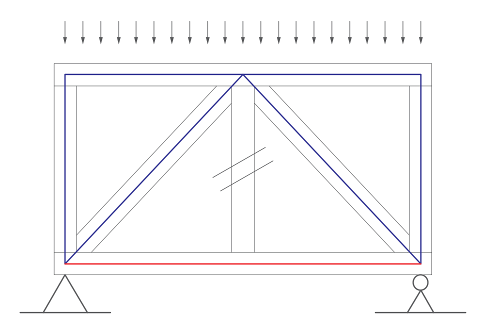


39d. Angle des façades Nord-Ouest et Sud-Ouest

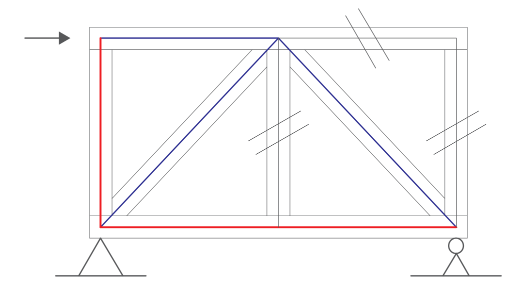


LES POSSIBILITÉS DE DEMAIN

Bois & Terre crue
Béton & Maçonnerie
Plastique & Plastique



40. Comportement statique d'un mur à ossature bois aux charges verticales



41. Comportement statique d'un mur à ossature bois aux charges horizontales

BOIS & TERRE CRUE

Les constructions en bois d'aujourd'hui, si on exclut les récents gratte-ciels ou tours d'une centaine d'étages, présentent de grandes similitudes avec les constructions à colombage du passé. Ces constructions ont su s'inspirer de leurs prédécesseurs afin de pallier leurs faiblesses et d'accroitre leurs avantages et leur individualité. Les coupler à un remplissage en 'terre allégée', c'est à dire un mélange, de terre crue et de paille, d'une masse volumique ρ inférieure à 1200 kg/m^3, renforce d'autant plus ce lien indéniable. On retrouve donc la composition en trois parties classiques des constructions vernaculaires alsaciennes : des fondations en 'dur', une ossature bois et un remplissage en terre crue.

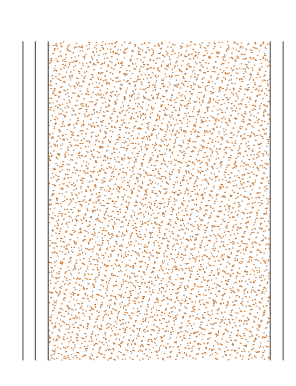
UNE CONCEPTION RATIONNELLE Malgré ces similitudes évidentes, des différences se sont formées au fil du temps. Ces différences trouvent leur origine dans l'influence des nouvelles méthodes de construction et des nouvelles technologies sur la tradition constructive à ossature bois. La différence la plus prononcée entre les colombages vernaculaires et les constructions en 'terre allégée' réside principalement dans l'ossature bois. Cette dernière reprend le même principe structurel de l'ossature porteuse en bois massif avec contreventement dans le plan, mais voit son dessin se rationaliser ; par cela il faut comprendre une utilisation plus judicieuse de la ressource naturelle du bois. En effet, avec l'avènement du dimensionnement des structures et de l'informatique, il est devenu possible de déterminer avec précision les charges gravitationnelles appliquées sur chaque composant de la structure et ainsi d'en définir la section et les propriétés idéales. Cette précision a permis d'éviter le surdimensionnement des poutres et poteaux en bois massifs des pans de bois, tare fréquente dans les constructions vernaculaires alsaciennes. De même, une connaissance plus approfondie de la descente des charges et du comportement structurel de ce type de structure a rendu possible la limitation du nombre de décharges nécessaires à la stabilité de l'édifice à un minimum. Elles restent cependant toujours en paires symétriques par rapport aux poteaux.

A cette nouvelle routine constructive succédait une autre nouvelle routine de conception et de production. Les charges gravitationnelles varient très peu d'une construction à l'autre ; les hauteurs d'étages restent semblables, seule la portée peut engendrer des variations. L'ensemble des constructions peut alors être conçue avec un 'catalogue' d'éléments linaires en bois massif standard préfabriqués en amont. L'édifice tout comme la structure se voient donc attribuer une trame régulière symétrique composée par la répétition d'un ou de plusieurs mêmes éléments assemblés sur le site. Le coût de la construction s'en voit alors réduit ainsi que sa complexité ; la où par le passé chaque pièce, de par son caractère unique, devait être préalablement marquée en atelier afin de ne pas l'égarer ou mal la placer *(fig. 8 et 9),* aujourd'hui un même élément linéaire en bois sera utilisé pour une fonction similaire et avec un même assemblage. On assiste alors à une standardisation de la construction en bois. Cette dernière est à la fois favorisée et battue en brèche par la conception assistée par ordinateur (CAO). En effet, l'informatique permet une duplication facile d'un même élément sur une trame régulière ou non, mais permet également depuis peu, la singularisation de tous les éléments porteurs. On peut ainsi dessiner à volonté un nombre d'assemblages et de détails résultant de la jonction de pièces uniques en bois réalisées en usine à l'aide d'une machine-outil à commande numérique (CNC). Ces constructions coûteuses et singulières restent cependant marginales.

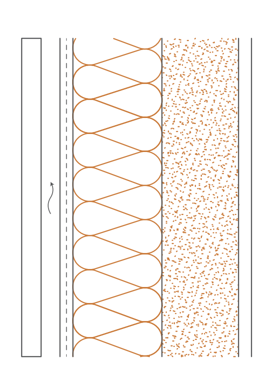
UNE UNITÉ MATÉRIELLE Quand à la matérialité de ce squelette en bois, un bois dur de la région sera toujours encore employé, tel le chêne ou le hêtre. L'utilisation principale du chêne n'est néanmoins plus une priorité, les boiseries n'étant plus exposées aux intempéries car recouvertes par une isolation et un enduit. On préfèrera tout de même construire l'ensemble de la structure avec une seule et même essence de bois afin d'éviter des mouvements différentiels liés aux variations de chaleur et d'humidité.

La protection contre l'humidité et le feu sont et seront toujours les premières préoccupations d'édifices à ossature

	Epaisseur e [m]	Résistance thermique R [m²K/W]



Mur enduit		
Enduit terre-fibres *1000 kg/m³*	0,02	0,06
Terre-paille *500 kg/m³*	0,35	2,50
Enduit terre-fibres *1000 kg/m³*	0,02	0,06
Enduit de fintion à la chaux *1800 kg/m³*	0,02	0,02
		$R_i + R_e = 0,17$ (1)
		$R_{tot} = 2,81$
Total	0,41 m	U = 0,36 W/m²K



Mur enduit avec bardage et isolant		
Enduit de chaux *1800 kg/m³*	0,02	0,02
Terre-paille *800 kg/m³*	0,12	0,48
Laine minérale *50 kg/m³*	0,14	3,50
Panneaux de fibres de bois *270 kg/m³*	0,02	0,36
Vide de ventilation	0,025	-
Bardage bois *600 kg/m³*	0,025	-
		$R_i + R_e = 0,21$ (1)
		$R_{tot} = 4,57$
Total	0,35 m	U = 0,22 W/m²K

42. Isolation thermique d'une structure en bois

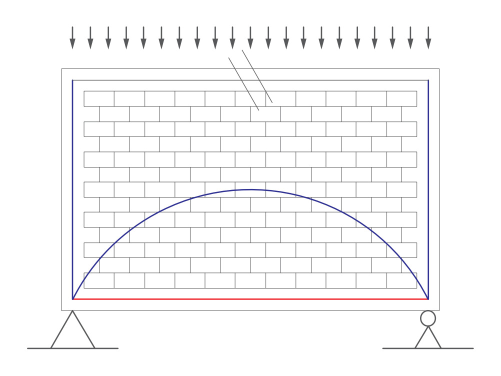
(1) résistance thermique des lames d'air intérieures R_i et extérieures R_e

bois. Tout comme pour les colombages traditionnels, cette protection est assurée par le remplissage. Ce dernier se compose d'un seul matériau naturel : la 'terre allégée', mélange de terre et de paille d'une masse volumique ρ totale inférieure à 1200 kg/m^3 sur le modèle du torchis traditionnel de masse volumique ρ entre 1200 et 1700 kg/m^3. Ce mélange, alors compacté dans un coffrage ou mis en œuvre de façon similaire à une maçonnerie, comble les interstices de l'ossature et la dédouble jusqu'à acquérir une épaisseur de 30 à 35 cm. Cette forte épaisseur de terre isole les éléments de l'ossature bois de l'extérieur limitant ainsi la quantité de surface susceptible de se consumer et de propager les incendies. De plus, la 'terre allégée', comme le torchis, est un matériau non combustible et se comporte donc de manière passive lors d'un incendie garantissant l'isolement des porteurs ponctuels. De manière similaire, cette forte surépaisseur du remplissage par rapport à la structure empêche le contact entre les éléments porteurs principaux et la pluie tombante ainsi que l'eau de rejaillissement. Il est alors possible de construire à même le soubassement en s'assurant de la bonne étanchéité de celui-ci. Un bardage extérieur pourrait également satisfaire ce rôle à la condition de laisser une lame d'air entre celui-ci et l'isolation. On préféra souvent s'en abstenir afin de garder la diversité des matériaux utilisés dans la construction au minimum. Un enduit de terre vient compléter l'ensemble afin d'en assurer une bonne étanchéité à l'air.

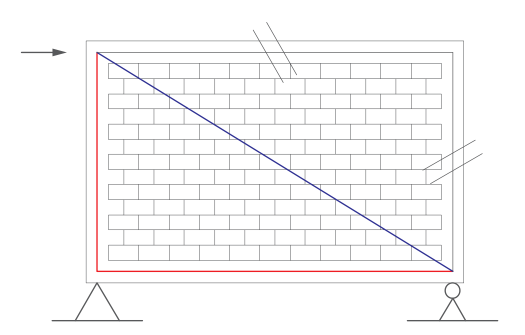
DES PERFORMANCES ENERGETIQUES UNIFORMES Le remplissage en 'terre allégée' étant détaché, non lié mécaniquement, avec le squelette en bois, ce dernier se voit donc attribuer à lui seul l'intégralité du rôle porteur de l'édifice sous charges gravitationnelles ou charges latérales *(fig. 40 et 41).* Le remplissage, exempt de tout rôle porteur, peut ainsi apporter ses performances énergétiques au bâtiment et réguler le climat des espaces intérieurs. La 'terre allégée' est un matériau isolant néanmoins bien moins performant que les usuels laine de verre ou laine de roche, respectivement d'un coefficient de conductivité thermique λ de 0,25 W/mK et 0,04 W/mK. Cependant, la grande épaisseur de ce remplissage due à la présence de porteurs ponctuels en bois massif de conductivité thermique λ de 0,21 W/mK et une finition d'enduit de chaux permet d'arriver à un coefficient de transmission thermique U de 0,36 W/m^{2}K. Un mur massif en 'terre allégée' de seulement 35 cm permet donc sans ajout aucun de satisfaire les exigences en matière d'isolation thermique avec un coefficient de transmission thermique U des murs extérieurs inférieur à 0,4 W/m^{2}K (SIA 180) *(fig. 42).*

En supplément d'une bonne isolation thermique, cette peau confère à l'espace intérieur un climat agréable et sain. En effet, la 'terre allégée', malgré sa faible masse volumique, est une excellente masse thermique de caractéristiques analogues à celles du le torchis. Ces murs amènent ainsi de la fraîcheur en une journée ensoleille d'été et de la chaleur en une nuit glaciale d'hiver. Ils agissent ainsi comme un poêle ou un radiateur à défaut de permettre un refroidissement ou réchauffement rapide de la pièce. Ces murs entre l'intérieur et l'extérieur ou entre deux espaces intérieurs forment également l'interstice d'échange de vapeur d'eau. Cette caractéristique de perspiration des murs en 'terre allégée' permet de réguler l'humidité des pièces aux alentours de 50% tout au long de l'année, en faisant bien évidemment abstraction de la salle de bain. Cette teneur médiane assure une bonne circulation sanguine des habitants et évite la formation de champignons ou les désagréments olfactifs.

• *En résumé,* les constructions en 'terre allégée' sont le résultat d'influences réciproques de la tradition constructive en bois et des nouvelles routines de construction, tels que le doublage de l'isolation par l'extérieur ou encore la préfabrication et la standardisation. On retrouve ainsi les trois matériaux naturels terre, paille et bois générant l'ensemble des espaces hors sol tandis que les espaces en sous-sol sont consolidés par des murs périphériques en béton armé. L'ossature bois est optimisée et les sections réduites afin de réduire le volume de bois utilisé dans la construction ainsi que les coûts de construction. Le remplissage investit toujours les interstices de l'ossature mais se dédouble également devant celle-ci afin de lui conférer les protections nécessaires contre le feu, l'eau et l'humidité. Cette forte épaisseur lui permet également de réguler le climat intérieur des pièces du bâtiment sans pour autant empiéter sur la surface au sol disponible.



43. Comportement statique d'un mur en maçonnerie chaînée aux charges verticales



44. Comportement statique d'un mur en maçonnerie chaînée aux charges horizontales

BETON & MAÇONNERIE

Le béton et la brique sont des matériaux répandus dans les constructions d'aujourd'hui et d'antan. Les matériaux sont eux-mêmes anciens mais leur foisonnement n'intervient que tardivement au milieu du XIXe siècle avec la révolution industrielle et surtout au XXe siècle avec les reconstructions d'après guerre. Ces deux matériaux sont souvent combinés au vu de leur comportement statique complémentaire. En effet, la brique résiste bien aux efforts de compression favorables pour les murs et cloisons porteuses mais très mal à la traction, tandis que le béton armé résiste aussi bien à la compression qu'à la traction, par l'ajout d'armatures métalliques, propices pour les planchers ou parapets. Dans d'autres cas, plus rares, la brique prend le rôle de simple remplissage d'un squelette en béton armé. Ici, la brique prend ainsi le même rôle que dans une construction à colombage traditionnelle : *« la brique [est] réduite à un rôle esthétique sans que ses qualités intrinsèques soient utilisées pleinement ».*[26] La maçonnerie chaînée, elle, profite des deux facettes de la maçonnerie en l'utilisant comme remplissage d'une ossature en béton armé et comme porteur des charges de gravité de la dalle.

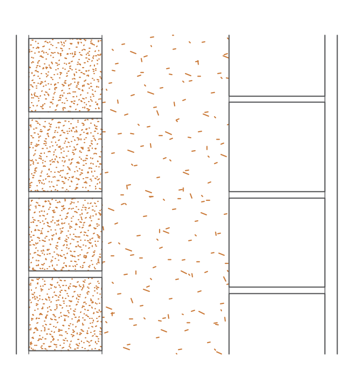
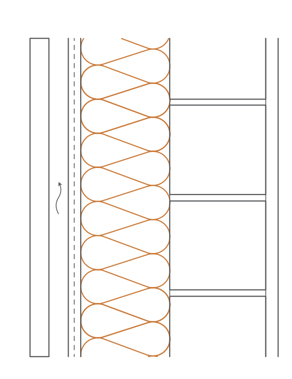
UNE CONSTRUCTION MIXTE Une construction en maçonnerie est généralement une construction mixte brique/ béton armé. La maçonnerie chaînée capitalise sur cette nature hybride de la construction en maçonnerie en appliquant, en plus des dalles et des linteaux, également des poteaux en béton armé en façade. Ces éléments de confinements améliorent la stabilité et l'intégrité de l'édifice face aux forces gravitationnelles et aux forces sismiques horizontales. En effet, les charges de gravité de la dalle se voient transmises aux fondations par l'intermédiaire des murs en maçonnerie et des colonnes en béton armé *(fig. 43).* Ces murs d'une résistance à la compression allant jusqu'à 20 N/mm² agissent alors comme des murs de refend, c'est à dire comme contreventement, pour des forces sismiques horizontales de direction parallèle à celle des murs. Les éléments de confinement en béton agissent alors, au contraire de la situation des charges gravitationnelles, comme des tirants et sont ainsi sollicités en traction (fig. 44). L'intégralité du mur agit ainsi comme porteur malgré des matériaux différents.

Tout comme le contreventement vertical, le contreventement horizontal est également assuré par une construction mixte béton/brique, les dalles. Ces dernières assument le rôle de diaphragme dans une construction en maçonnerie chaînée, elles assurent ainsi une répartition uniforme des charges sur l'ensemble des éléments verticaux de contreventement permettant un dimensionnement similaire des différentes parties de l'édifice. La rigidité du diaphragme est assurée par une série de solives reliées entre elles par un remplissage rigide et un plancher en béton. On retrouve ainsi une maçonnerie confinée par des éléments de renforcement en béton armé.

Cette combinaison n'est tout de même pas sans risques. En effet, la synergie structurelle de ces deux matériaux peut être aisément compromise par une mise en œuvre maladroite de ces derniers. Afin d'éviter un tel scénario, il est impératif de chaîner physiquement les colonnes en béton et la maçonnerie, ce qui explique la géométrie dentelée des éléments verticaux en béton armé, tout en assurant un joint élastique permettant une dilatation différentielle des matériaux. Ces deux conditions sont réalisées par un montage en deux temps des cloisons, en premier lieu les murs de maçonnerie et les armatures puis les éléments de confinement sont coulés sur place.

UNE CONSTRUCTION MULTICOUCHE La présence d'un mur de comportement statique monolithique malgré les différents matériaux utilisés permet entre autre une faible épaisseur du système porteur (entre 15 à 20 cm pour une construction de deux étages sur rez-de-chaussée). Néanmoins, la brique ayant un rôle porteur se voit attribuer une forte masse volumique entre 1800 et 2100 kg/m^3 et par conséquent un grand coefficient de conductivité thermique λ de 0,81 W/mK. De manière similaire le béton armé est un très mauvais isolant avec un coefficient de conductivité thermique λ de 2,1 W/mK.

Cette couche structurelle perd alors l'ensemble de ses capacités d'isolation thermique et un besoin d'une couche

		Epaisseur e [m]	Résistance thermique R [m²K/W]
	**Mur enduit avec isolant extérieur**		
	Enduit terre-fibres *1000 kg/m³*	0,02	0,06
	Maçonnerie en brique pleine *1800 kg/m³*	0,15	0,19
	Terre-copeaux de bois *400 kg/m³*	0,2	1,67
	Maçonnerie en terre allégée *700 kg/m³*	0,115	0,55
	Enduit de fintion à la chaux *1800 kg/m³*	0,02	0,02
			$R_i + R_e$ = 0,21 (1)
			R_{tot} = 2,70
	Total	0,505 m	U = 0,37 W/m²K
	**Mur enduit avec bardage et isolant**		
	Enduit de chaux *1800 kg/m³*	0,02	0,02
	Maçonnerie en brique pleine *1800 kg/m³*	0,15	0,19
	Laine minérale *50 kg/m³*	0,14	3,50
	Panneaux de fibres de bois *270 kg/m³*	0,02	0,36
	Vide de ventilation	0,025	-
	Bardage bois *600 kg/m³*	0,025	-
			$R_i + R_e$ = 0,21 (1)
			R_{tot} = 4,28
	Total	0,38 m	U = 0,23 W/m²K

45. Isolation thermique d'une maçonnerie confinée

(1) résistance thermique des lames d'air intérieures R_i et extérieures R_e

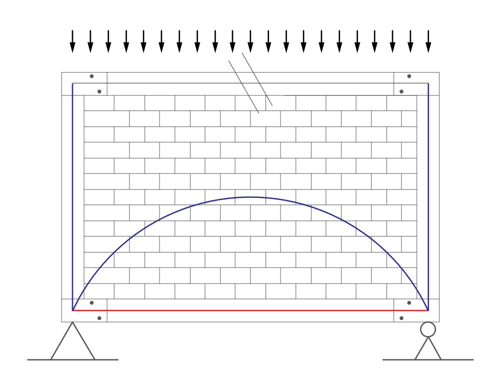
d'isolation supplémentaire apparaît. Cette isolation autoportante ou sur support est ainsi indépendante du système statique de l'édifice et de ses déformations ; le choix des matériaux est alors plus libre et axé uniquement sur les performances thermiques. Une isolation en 'terre allégée' humide ou sèche est tout de même vivement conseillée au vu de la capacité intrinsèque de la brique à réguler l'humidité *(fig. 45)*.

UNE CONSTRUCTION ÉCONOME La diversité des matériaux souvent critiquée dans les constructions en maçonnerie chaînée présente tout de même un avantage non négligeable, *« béton, verre et brique se mêlent comme l'exigent les fonctions de l'édifice »*[27] ; à chaque matériau un rôle propre est attribué. Ceci a pour conséquence une utilisation des matériaux selon leurs qualités intrinsèques et ainsi un dimensionnement optimisé limitant les quantités de matières utilisées. Un isolant naturel vient combler les faiblesses énergétiques des briques pleines, évitant des murs d'une épaisseur trop importante. Les éléments de confinement en béton profitent des murs porteurs en brique pour voir leurs efforts réduits et par conséquent leur section.

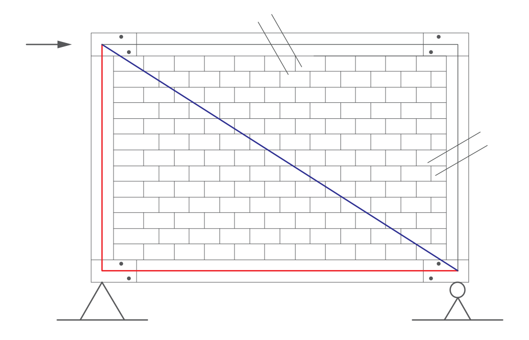
Un comportement statique monolithique similaire aux murs en béton armé est ainsi créé avec uniquement un tiers de la matière. Le béton profite également des éléments en maçonnerie dans sa mise en œuvre. En effet, les murs de maçonnerie étant assemblés préalablement deviennent des éléments d'un coffrage perdu. De plus, les briques étant préfabriquées et les éléments verticaux en béton limités aux angles de l'édifice et aux jonctions des murs intérieurs et extérieurs, le coffrage lui-même et la durée de construction se voient réduits.

• *En résumé,* les constructions à colombage traditionnelles et les constructions en maçonnerie chaînée présentent une analogie constructive en combinant toutes les deux une ossature et un remplissage procurant un contreventement tout en permettant le mouvement du squelette. L'ajout du béton armé dans le système, la brique étant déjà utilisé comme variante luxueuse de torchis à partir du XVIe siècle, ouvre les portes à des constructions de dimensions plus grandes et de fonctions plus vastes, plus diversifiées.

Du coté des performances en matière de confort, ces constructions peuvent profiter de l'ensemble des innovations apportées par les constructions en terre. En effet, tout comme les constructions en 'terre allégée,' l'ensemble de la maçonnerie peut être construit en un seul matériau, la terre. Ainsi une brique pleine porteuse peut succéder à une brique de terre crue isolante ou un bloc de pisé à une cloison épaisse de 'terre allégée'.



46. Comportement statique d'un mur en maçonnerie plastique aux charges verticales



47. Comportement statique d'un mur en maçonnerie plastique aux charges horizontales

PLASTIQUE & PLASTIQUE

L'introduction du plastique en tant que matériau de construction remonte au début du XXe siècle et atteint son apogée pendant les années 1960 et 1970. La publication du journal *'Kunststoff'* - terminologie allemande pour plastique - en 1911, vulgarise la connaissance et la conscience du plastique dans le monde. Les plastiques sont donc des matériaux relativement récents mais leurs performances sont connues depuis la fin des années 1940, époque à laquelle la majorité des plastiques couramment utilisés dans les constructions contemporaines a été développée. L'initiative *'Conceptos Plasticos'* ne chercha pas à découvrir ou créer un nouveau plastique, mais uniquement à développer un système modulaire pouvant être construit en série, tout en profitant de sa résistance intrinsèque et de son faible poids.

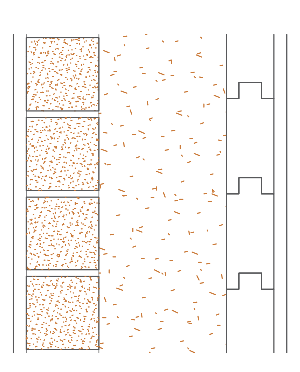
UN SYSTÈME ÉCONOME *« La motivation derrière le développement des matériaux actuels remonte au début de la période d'industrialisation et au besoin d'une alternative synthétique et artificielle à la matière première naturelle très prisée mais chère »*[28] tout comme l'initiative *'Conceptos Plasticos'* d'Oscar Mendez ; cette dernière a en effet pour but d'offrir un logement abordable aux plus démunis. Donner une seconde vie aux déchets plastiques et aux vieux pneus en les utilisant dans la construction permet de remplir un objectif double ; d'une part de réduire l'impact environnemental du plastique et d'autre part de réduire les coûts de la matière première et par conséquent celle de la construction.

Construire en plastique recyclé ne présente pas uniquement des avantages quant au prix de la matière première mais également en matière de mise en œuvre. En effet, les plastiques, grâce aux procédés de fabrication, sont capables de prendre librement les formes voulues. Une grande diversité des formes rend néanmoins le processus onéreux. Les systèmes modulaires propices à la fabrication en série d'un même élément de construction sont donc idéals et peu coûteux. Le système modulaire par excellence est le mur en maçonnerie ; un module, la brique, génère l'ensemble des cloisons porteuses et les cloisons de séparation *(fig. 46).* Ce système peut alors être, de manière similaire à la maçonnerie chaînée, complété par des colonnes et des poutres afin d'éviter son renversement *(fig. 47).* On obtient ainsi un système constructif composé uniquement de trois éléments différents : briques, poutres et colonnes mais exécuté dans un seul matériau : le plastique.

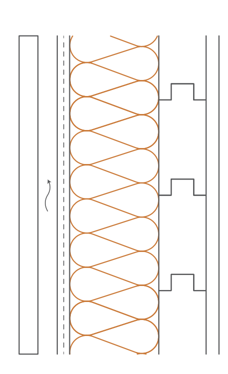
UNE FACILITÉ D'ASSEMBLAGE Les difficultés des constructions modulables restent souvent liées à la problématique de l'assemblage des modules et des matériaux. Le système 'LEGO' développé par la compagnie *'Conceptos Plasticos'* en revanche capitalise sur ces assemblages pour assurer un montage simple et une stabilité suffisante de la construction. En effet, les briques, les poutres et les montants verticaux sont profilés lors du processus de fabrication par extrusion afin de permettre l'imbrication de ces derniers les uns dans les autres. Les briques de trois kilos sont donc assemblées dans un même mouvement entre elles et avec les montants par pression, c'est à dire sans liants. L'alignement coplanaire des montants verticaux et des tirants horizontaux, les poutres, est assuré par des platines métalliques ajoutées en tête et en pied des montants.

L'ensemble de l'édifice étant construit avec un seul et même matériau, éléments de confinement et tirants tout deux en plastique, les déplacements différentiels liés aux changements de températures ou d'humidité sont ainsi effacés. En contrepartie, le flambement des éléments verticaux et horizontaux en plastique reste une menace quant à la stabilité générale du bâtiment. Là aussi aucun élément étranger au système n'est nécessaire dans ce type de construction en maçonnerie plastique confinée. En effet, par le simple geste d'imbriquer les cloisons aux montants, ces derniers sont contreventés et stabilisés sur l'ensemble de leur hauteur, limitant ainsi leurs déformations. Le risque d'effondrement après séisme lié à une mauvaise construction est ainsi éliminé.

	Epaisseur e *[m]*	Résistance thermique R *[m²K/W]*



Mur enduit avec isolant extérieur		
Enduit terre-fibres *1000 kg/m³*	0,02	0,06
Maçonnerie en brique plastique *1300 kg/m³* (2)	0,075 (2)	0,42 (2)
Terre-copeaux de bois *400 kg/m³*	0,2	1,67
Maçonnerie en terre allégée *700 kg/m³*	0,115	0,55
Enduit de fintion à la chaux *1800 kg/m³*	0,02	0,02
		$R_i + R_e$ = 0,21 (1)
		R_{tot} = 2,93
Total	0,43 m	U = 0,34 W/m²K



Mur enduit avec bardage et isolant		
Enduit de chaux *1800 kg/m³*	0,02	0,02
Maçonnerie en brique plastique *1300 kg/m³* (2)	0,075 (2)	0,42 (2)
Laine minérale *50 kg/m³*	0,14	3,50
Panneaux de fibres de bois *270 kg/m³*	0,02	0,36
Vide de ventilation	0,025	-
Bardage bois *600 kg/m³*	0,025	-
		$R_i + R_e$ = 0,21 (1)
		R_{tot} = 4,51
Total	0,305 m	U = 0,22 W/m²K

48. Isolation thermique d'une maçonnerie plastique

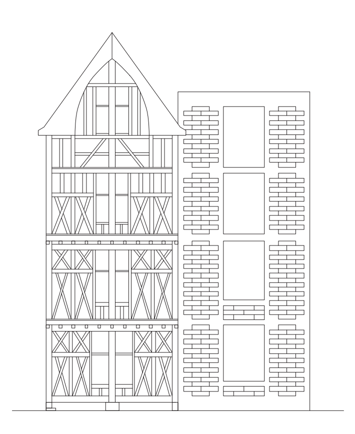
(1) résistance thermique des lames d'air intérieures R_i et extérieures R_e

(2) valeur estimée personnellement d'après celle du caoutchouc et du PVC, principaux composants de la brique plastique, du fait du manque de données à ce sujet

DES PERFORMANCES PERSONNALISABLES Malgré les avantages liés à cette aisance de mise en œuvre, les plastiques présentent certaines faiblesses contraignantes pour leur utilisation dans la structure porteuse d'un bâtiment, notamment leur comportement en cas d'incendie. Le plastique de manière générale résiste uniquement un très court moment au feu avant de fondre produisant ainsi des gouttelettes enflammées contribuant à la propagation de l'incendie dans l'édifice en multipliant les sources de chaleur. Ces propriétés sont cependant variables d'un type de plastique à un autre du fait de différences dans les structures moléculaires. La combinaison de plusieurs couches de plastiques, similaires ou différents, selon la méthode d'extrusion multicouches permet alors également de créer des composants de propriétés combinées. Ce procédé s'est propagé au delà des matériaux plastiques. Le récent développement des matériaux composites permet de combiner des matériaux de natures différentes pour *« combiner les propriétés avantageuses spécifiques de différents matériaux entre eux pour créer des solutions intelligentes et en même temps économiques »*. [29]

Ce caractère composite peut également se retrouver dans le mur lui-même. En effet, les cloisons extérieures en maçonnerie plastique nécessitent un ajout supplémentaire d'isolation pour satisfaire la norme européenne en ce domaine. Pour ce faire, les éléments porteurs peuvent être pris en 'sandwich' par deux couches de 'terre allégée,' non combustibles, protégeant ainsi le plastique en cas d'incendie. - La conformité de chaque construction reste cependant soumise à approbation. - Ces couches isolantes protègent également les porteurs et les espaces de vie quant à de trop grandes variations de température tout au long de l'année de par leur faible coefficient de conductivité thermique λ de 0,35 W/mK *(fig. 48).*

• *En résumé,* construire en plastique porteur est aujourd'hui possible mais néanmoins difficile par l'absence de norme et de certification à ce sujet. Un développement continu des matériaux plastiques connus par l'ajout d'autres matériaux plastiques ou composites et simultanément de leur forme pourrait néanmoins aboutir à une fabrication en série certifiée de logements ou de systèmes porteurs en plastique. Attention toutefois à ne pas oublier l'aspect environnemental lié au cycle de vie complet des plastiques et des éléments composites souvent difficiles à recycler. Dans le cas d'une maçonnerie en plastique il est cependant envisageable de considérer le recyclage du matériau par la réutilisation des éléments, briques et éléments linéaires, d'une manière similaire à la réutilisation d'éléments porteurs en bois dans les colombages traditionnels.



VERS UN PROJET

Colombages 2.0
A la découverte de Riquewihr



49. Ungersheim, France. *'Maison alsacienne du XXIe siècle,'* Mathieu Winter

COLOMBAGE 2.0

Depuis les premières constructions à colombage du milieu du XIIIe siècle jusqu'à leur abandon quasi-total au début du XXe siècle, de nombreuses évolutions se sont succédées gardant toujours en ligne de mire un même objectif principal : offrir un abri à tout un chacun. Cette longue tradition constructive fait foi du savoir vivre de nos ancêtres comme de leurs incertitudes tout en arborant les couleurs vives tant caractéristiques des centres villes historiques alsaciens d'aujourd'hui. En cela, l'ensemble des variantes régionales à travers le temps partage les mêmes valeurs, les mêmes caractéristiques malgré des différences parfois extrêmes. En effet, ces variantes s'efforcent toutes de proposer une habitation économique et durable aux familles alsaciennes s'installant dans les villes et villages.

L'intégrité des constructions à colombage était alors assurée par les charpentiers, vrais orfèvres de la construction en pan de bois. Leur connaissance du bois local et de ses performances a permis l'élaboration progressive d'un système porteur à ossature triangulée hiérarchisée minimisant l'utilisation d'une des matières premières les plus convoitées du Moyen-Âge, le bois. Cette ossature bois du bâtiment, ne composant alors plus qu'un tiers des cloisons sans pour autant compromettre ses propriétés parasismiques, a rendu possible une utilisation parcimonieuse des différentes essences de bois par rapport aux systèmes de construction en rondin ou en madrier préalablement employés et ainsi une réduction proportionnelle du coût de construction. L'utilisation conjointe d'un autre matériau naturel, cette fois-ci abondant, la terre, accentuait encore davantage cette réduction. De plus, la simplicité de mise en œuvre de la terre sous forme de torchis a également contribué à la possibilité pour le propriétaire et sa famille de participer partiellement à la construction et à l'entretien de leur habitation. Cette contribution à la construction par ses habitants est également une des origines principales de la durabilité des constructions à colombage. En effet, l'enduit en terre extérieur et intérieur protège l'ensemble de l'édifice des intempéries, de l'humidité stagnante, du vent, des rongeurs, etc. mais nécessite un entretien régulier important. Cet enduit assure également l'étanchéité à l'air de ces constructions à colombage ; il en assure donc leur confort avec les hourdis qui remplissent le rôle d'isolant et de masse thermique. Ces derniers, en plus d'assurer une température intérieure adéquate, régulent également l'humidité des espaces de vie et de la structure empêchant ainsi la formation de champignons susceptibles d'endommager l'ossature et de compromettre son intégrité structurelle.

Malgré près de huit siècles depuis l'apparition des premières constructions à colombage, de nombreux parallèles peuvent être tirés quant aux enjeux et aux motivations des constructions d'antan et contemporaines : une volonté de sauvegarder nos matériaux naturels par leur utilisation parcimonieuse et adéquate ; une volonté de préserver nos énergies fossiles par une utilisation accrue des énergies passives ; une volonté d'assurer une intégrité structurelle à long terme, et une nécessité de modérer les coûts de construction. Par le passé il n'existait qu'un seul et unique duo répondant à l'ensemble de ces enjeux, le duo bois/terre ; aujourd'hui d'autres options et combinaisons sont possibles.

Des quatre solutions étudiées, le système constructif proposé par la compagnie '*Conceptos Plasticos*' semble être le moins probable, la diversité des matériaux recyclés, même triés avec soin, ne peut garantir des performances stables et uniformes pour les différents lots de production conduisant à des difficultés de certification. De manière similaire, il est difficile de déterminer et d'assurer avec certitude les performances thermiques de la 'terre allégée' produite in-situ ; il existe néanmoins des produits certifiés prêts à l'emploi les garantissant, réduisant ainsi les problématiques d'accréditation. Cependant la présence d'une ossature en bois normée et certifiée les élimine entièrement. Ici, les matériaux manquent toutefois de complémentarité pour aboutir et à un bon comportement structurel et à un bon comportement énergétique. Seules les constructions en maçonnerie chaînée présentent cette dualité. En effet, l'intégrité structurelle de l'édifice est assurée simultanément par les éléments de confinement en béton et les murs de refend en maçonnerie de terre cuite, de terre crue ou en pisé, ces derniers jouant également le rôle d'isolant et de régulateur d'humidité.

Le projet de master permettra d'étudier plus en détail les possibilités de chaque système afin de proposer un duo complémentaire de matériaux répondant à la fois aux normes structurelles et aux normes énergétiques en vigueur dans la seule épaisseur du mur : un colombage 2.0.



50a. Riquewihr, France. Photo aérienne de la ville et de sa fortification avec implantation du projet

A LA DÉCOUVERTE DE RIQUEWIHR

Riquewihr est une petite cité médiévale pittoresque située au plein cœur du vignoble alsacien à une quinzaine de kilomètres de la ville de Colmar, préfecture du département du Haut-Rhin. Son axe principal Est-Ouest, reliant la porte basse et la porte haute de l'enceinte fortifiée du XIIIe siècle, scinde la ville en deux parties. Les axes Nord-Sud en délimitaient les quartiers sans pour autant, jadis, offrir une issue hors des remparts ; aujourd'hui des issues piétonnes permettent l'accès aux nombreux parkings entourant la ville. Ces remparts englobent dans leur périmètre une grande abondance de maisons traditionnelles à colombage s'étalant sur 330 mètres de long et 220 mètres de large.

Ses importantes fortifications et la position en cul de sac de la ville de Riquewihr, statut de ville obtenu en 1302, a permis à cette dernière d'échapper à de nombreuses destructions notamment celle des deux guerres mondiales. Elles ne la protègent cependant pas des dangers naturels tels le vent ou le feu. C'est ainsi qu'au matin de la nouvelle année 2014, Riquewihr a perdu, détruites par les flammes, deux bâtisses en colombage datant du XVIe siècle et qui marquaient la fin de son axe principal juste avant la tour Dolder, porte haute de la première fortification. Les travaux de reconstruction des deux maisons sinistrées, 60 rue du Général-de-Gaulle et 2 rue des Juifs, n'ont cependant toujours pas débuté en raison d'un litige privé d'assurance. Les propriétaires des deux édifices ont la ferme intention de conserver son visage historique à la ville, comme le témoigne un des propriétaires : *« j'aurais pu encaisser les indemnisations et vendre, mais reconstruire est mon devoir : pour le patrimoine et mes enfants [...]. »* [30]

Le projet se propose donc d'investir cette 'dent creuse' qui défigure un joyau touristique d'Alsace comme laboratoire de construction à colombage 2.0 dans un centre médiéval historique aux enjeux culturels, symboliques et ornementaux forts.

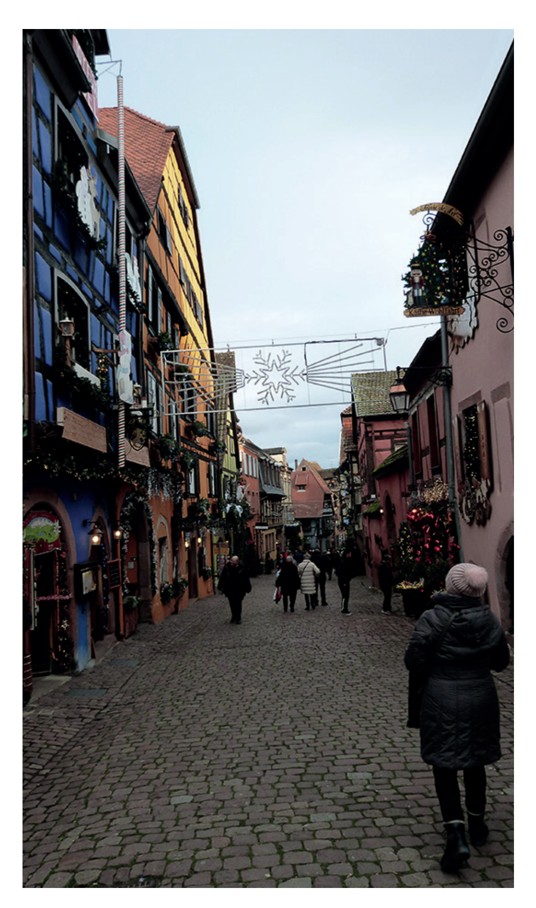
pages suivantes :

51. Riquewihr, France. Angle de la rue des juifs et du Général-de-Gaulle, état antérieur à l'incendie du 1er janvier 2014 (à gauche)

52. Riquewihr, France. Angle de la rue des juifs et du Général-de-Gaulle, état du 4 décembre 2017 (à droite)



50b. Riquewihr, France. 5 rue des Trois Eglises



50c. Riquewihr, France. Rue du Général-de-Gaulle



50d. Riquewihr, france. 'Dent creuse' à l'angle de la rue des Juifs et de la rue du Général-de-Gaulle



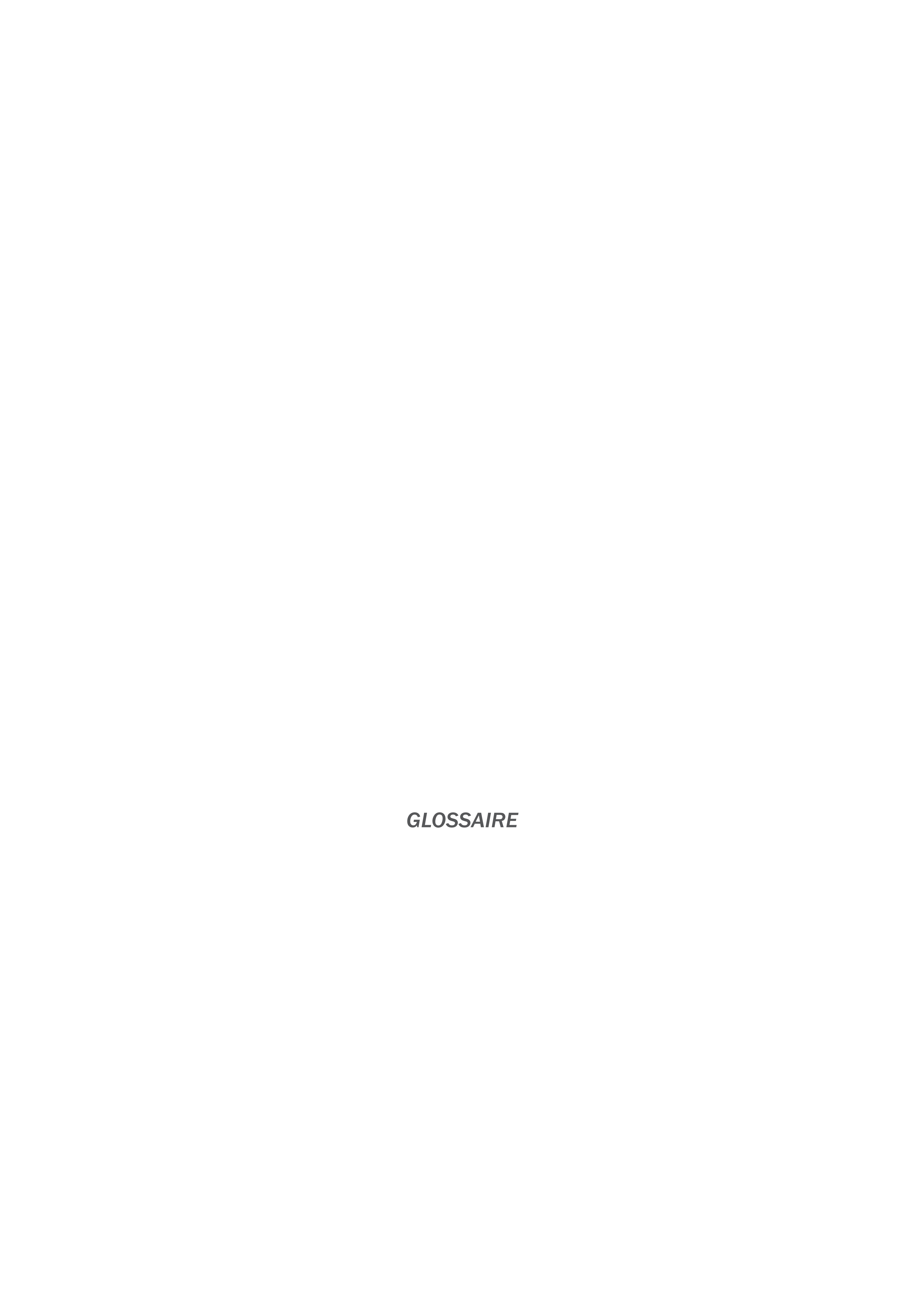
50e. Riquewihr, France. Le Dolder


FEERIE DE NOEL



Ne crains pas d'être démodé. Changer les anciennes techniques n'est permis que si cela peut apporter une amélioration ; sinon, mieux vaut s'en tenir à l'ancien. Car la vérité, même datant de plusieurs siècles, entretient plus de liens intimes avec nous que le mensonge qui nous accompagne. [31]

Adolf Loos, 1913



GLOSSAIRE

LEXIQUE

Par souci de normalisation des termes techniques, la plupart des définitions proposées ci-après est tirée de Pérouse de Montclos, Jean-Marie, ***Architecture : description et vocabulaire méthodiques***. Paris : Éd. du Patrimoine, Centre des Monuments Nationaux, 2011, 672 p.

Les termes principaux sont indiqués en lettres minuscules et les degrés inférieurs apparaissent en *italique*. Les terminologies manquantes ont été extraites du dictionnaire ***Larousse***, http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais et apparaisent en lettres minuscules noires.

Aisselier : lien travaillant dans un plan vertical, soulageant une pièce horizontale et portant sur une pièce verticale ou oblique.

Appui : surface horizontale inférieure d'une baie ne descendant pas jusqu'au sol ; élément, assise ou tablette, limitant cette baie par le bas et couronnant l'allège ou le mur sous-appui.

Arbalétrier : pièce oblique d'une ferme. Les deux arbalétriers portent les versants du toit. Ils sont généralement assemblés à leur base dans un entrait et à leur sommet commun dans un poinçon. Le *chevron-arbalétrier* est la pièce oblique des charpentes à chevrons-portant-ferme, qui joue à la fois le rôle d'arbalétrier et de chevron.

Articulation : liaison entre deux éléments autorisant la variation de l'angle formé par ces deux éléments.

Assemblage : procédé de liaison de pièces de charpente entre elles par combinaison de section. Un *assemblage à mi-bois* décrit un assemblage de deux pièces en croix présentant le même creux en polyèdre rectangle entaillant chaque pièce de la moitié de son épaisseur et s'ajustant l'un à l'autre. Un *assemblage à tenons et mortaise* quant à lui décrit un assemblage d'une pièce dont l'extrémité présente en son milieu un tenon, ou saillant en polyèdre rectangle épargné par la taille, s'ajustant dans une mortaise qui reproduit la forme du tenon en creux sur l'autre pièce. Un *assemblage à queue d'aronde* est un assemblage de deux pièces en croix, l'une présentant à son extrémité un saillant en polyèdre dont la largeur augmente de son attache à la pièce à son extrémité (ce saillant affecte approximativement l'aspect d'une queue d'hirondelle) ; l'autre, en creux de même forme, le saillant s'ajustant dans le creux

Âtre : aire de pierre, de brique, de carreaux réfractaires, de fonte, etc. formant le sol d'un foyer.

Badigeon : lait de chaux généralement additionné à un colorant que l'on applique sur un parement.

Baies : ouverture feinte ou réelle, ménagée dans une partie construite, et son encadrement.

Charpente à chevrons-portant-ferme *ou* Charpente de toit à chevrons-arbalétriers : dans cette charpente, une même pièce joue le rôle d'arbalétrier, qui est une pièce de ferme, et de chevron, qui est une pièce de couverture. Cette charpente n'a pas de panne et porte directement la couverture.

Chevron : pièce oblique d'un versant de toit, posée sur les pannes et portant la couverture.

Clayonnage : armature en bois des murs employée dans la technique du torchis.

Contreventement : ensemble des pièces assurant la stabilité des pan de bois et des charpentes par triangulation afin de prévenir leur déformation sous l'action des charges et des poussées.

Décharge : pièce secondaire oblique assemblée entre deux pièces horizontales au même aplomb. Elle a comme fonction de décharger la pièce supérieure sur la pièce inférieure.

Diaphragme : ouvrage plan horizontal (plancher) ou incliné (versant de toiture) conçu pour résister aux forces qui agissent dans son plan.

Encorbellement : surplomb allongé porté par une suite de supports (corbeaux, consoles, bouts de solives, etc.).

Entrait : pièce maîtresse horizontale d'une ferme, dans laquelle sont assemblés les pieds des arbalétriers, des chevrons-arbalétrier ou des jambes de forces.

Entretoise : étrésillon horizontal, placé entre deux pièces parallèles et perpendiculairement à celles-ci.

Etalon *ou* Etelon : dessin grandeur nature d'une charpente à exécuter.

Etrésillon : pièce secondaire assemblée entre deux autres pièces ayant pour fonction d'en maintenir l'écartement.

Faux-entrait : pièce horizontale d'une ferme réunissant les arbalétriers ou les chevrons à un niveau supérieur à celui de leur pieds doublant un entrait.

Ferme : ensemble des pièces assemblées dans un plan vertical et transversal à la longueur du toit.

Flambement *ou* Flambage : phénomène d'instabilité de forme qui se manifeste dans des pièces soumises à un effort normal de compression.

Gousset : lien placé dans un angle droit, sauf le cas où ce lien travaillant dans un plan vertical soulage une pièce horizontale, car il s'agit alors d'un aisselier.

Guette : pièce oblique de remplissage dans un pan de bois. Les guettes ont habituellement une fonction précise à laquelle correspond des désignations particulières : les décharges, les étrésillons, les liens compris dans un pan de bois sont des guettes.

Hourdis : remplissage d'un pan de bois en planches, en briques, en torchis, en plâtre, etc.

Hygroscopie *ou* Hygrométrie : science qui a pour objet de déterminer le degré d'humidité de l'air.

'Kachelofe' : construction massive, immobile et adossée à un mur, dont le foyer est alimenté en combustible depuis une autre pièce à travers une ouverture pratiquée dans le mur.

Lien : petite pièce droite ou courbe placée obliquement dans l'angle de deux autres pièces pour affermir cet angle par triangulation.

Loggia : pièce à l'étage ouverte sur l'extérieur : ses baies n'ont pas de menuiserie.

Moellon : pierre de petite dimension, non taillée ou partiellement taillée.

Mortaise : cavité de section généralement rectangulaire, pratiquée dans une pièce de bois ou de métal, pour recevoir le tenon d'une autre pièce assemblée.

Palançon *ou* Palençon : bois armant et supportant le torchis.

Palée : support en charpente formé de

poteaux réunis par des liens.

Pan de bois *ou* Pan-de-bois : ensemble des pièces de charpente assemblé dans un même pan vertical.

Panne : pièce horizontale d'un versant de toit posée sur les arbalétriers et portant les chevrons. La *panne faîtière* est la pièce maîtresse de la charpente posée sous l'arrête supérieure du toit.

Parapet : mur plein formant garde-corps.

Perspiration : évaporation de l'eau à la surface de la peau, soit d'une manière insensible, soit après transpiration. Architecture, capacité des matériaux à laisser traverser de manière plus ou moins importante la vapeur d'eau.

Poteau : pièce maîtresse verticale. Les *poteaux corniers* forment l'angle de deux murs. Les *poteaux d'huisserie* limitent une ouverte sur ses cotés. Les *poteaux médians* sont des poteaux d'un pan de bois montant de fond en comble d'une seule pièce, sauf quand ils supportent la panne faîtière, cas où ils prennent la dénomination de *poteaux faîtiers*.

Poutraison : assemblage de poutres ; ensemble des poutres et des solives d'un plancher.

Sablière : pièce maîtresse horizontale posée sur l'épaisseur d'un mur dans le même plan que celui-ci. Les *sablières de toit*, perpendiculaires aux fermes, portent celles-ci de chaque côté. Les *sablières de plancher* portent les solives dont les bouts sont assemblés dans les sablières ou posés sur celle-ci. La *sablière basse* forme la limite inférieure du pan de bois, isolé du sol par un solin ou un mur plus ou moins élevé. Les *sablières de chambrée* sont posées sur le bout des solives ou au bout des solives en s'assemblant entre deux solives plus longues que les autres.

Solin : partie inférieure d'un mur formée d'une assise ou d'un petit nombre d'assises dans un matériau, isolant celui-ci du sol.

Tenon : partie saillante, à l'extrémité d'une pièce, destinée a s'ajuster dans une partie creuse correspondante (mortaise).

Torchis : matériau formé de terre grasse et de paille hachée employé comme remplissage.

Trumeau : pan de mur entre deux embrasures au même niveau.

GRANDEURS PHYSIQUES

Par souci de normalisation des termes techniques, la plupart des définitions proposées ci-après est tirée de Jedidi, Malek, et Omrane Benjeddou. 2016. ***La thermique du bâtiment : du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation***. Technique et ingénierie. Froid et génie climatique. Paris : Dunod ; et Volhard, Franz. 2016. ***Bauen mit Leichtlehm: Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm.*** 8., Neu bearbeitete und ergänzte Auflage. Basel, © 2016: Birkhäuser.

Coefficient d'absorption w : capacité de succion d'un matériau à court terme. Son unité est le $kg/m^2k^{0.5}$.

Coefficient de diffusion à la vapeur d'eau µ : résistance qu'un matériau oppose à la diffusion de l'humidité contenue dans l'air. Ce coefficient n'a pas d'unité.

Coefficient de transmission thermique U : Quantité de chaleur passant par seconde à travers $1m^2$ de matériau stable pour une différence de température entre les deux ambiances de un degré. Son unité est le W/m^2K.

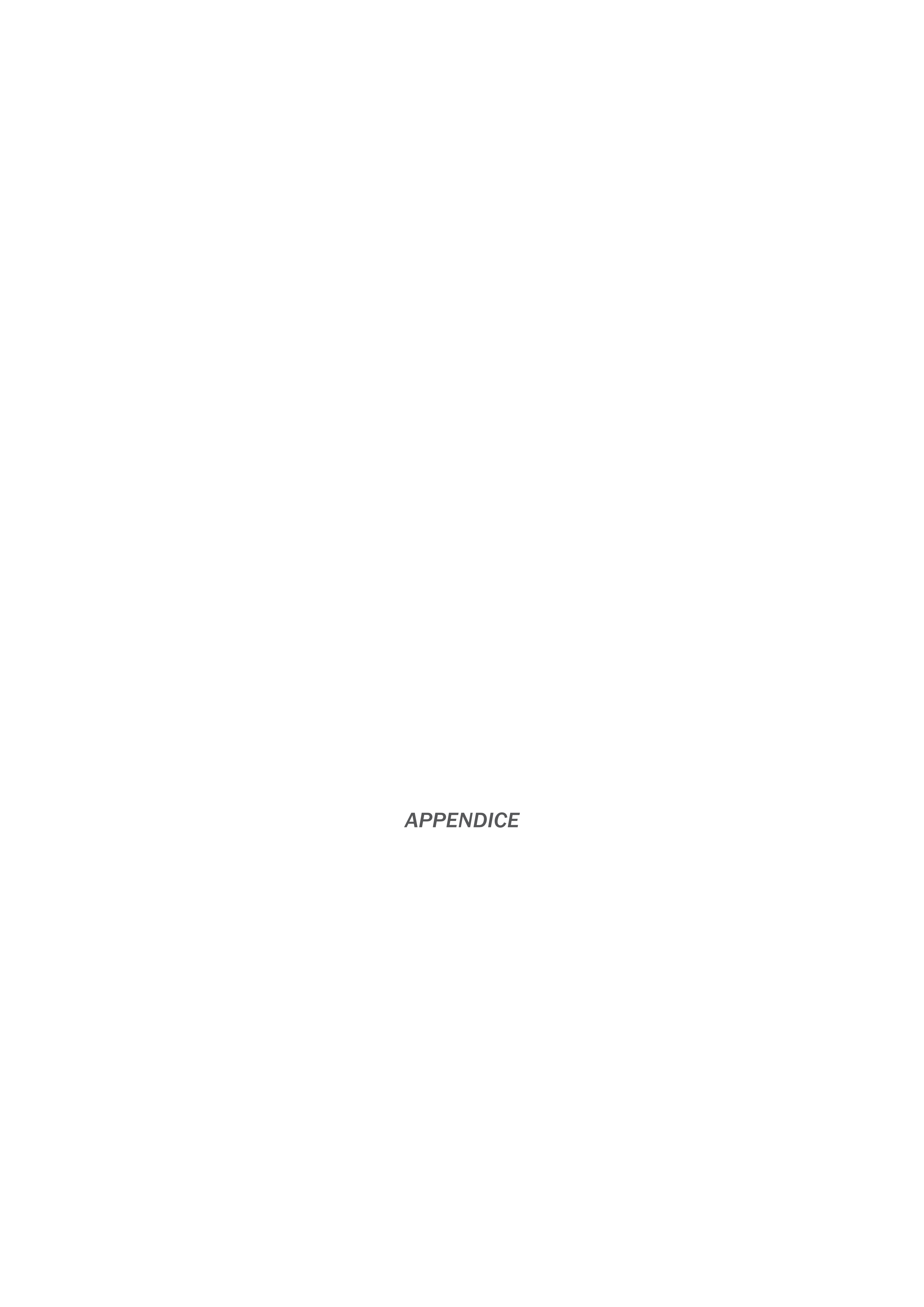
Conductivité thermique λ : flux de chaleur traversant un mètre d'épaisseur d'un matériau pour une différence de un degré entre ses deux surfaces. Son unité est le W/mK.

Effusivité thermique b : vitesse à laquelle un matériau absorbe ou restitue une quantité de chaleur. Son unité est le $J/m^2k^{0.5}$.

Masse volumique ρ : quotient de la masse d'une substance par son volume. Son unité est le kg/m^3.

Résistance thermique R : aptitude d'un matériau à ralentir la propagation de l'énergie qui le traverse. Son unité est le m^2K/W.

Teneur en eau normale w : teneur en eau hygroscopique d'un matériau. Ce coefficient est exprimé en %.



APPENDICE

NOTES

UN VERNACULAIRE OUBLIE

1. Pierre Frey, *Learning from Vernacular: Towards a New Vernacular Architecture* (Arles : Actes sud, 2010), 45.

UN RATIONALISME LOCAL

2. Maurice Ruch, *La maison alsacienne à colombage* (Paris : Berger-Levrault, 1977), 39

3. Association française du génie parasismique, *Guide de la conception parasismique des bâtiments* (Paris : Éditions Eyrolles, 2004), 46.

4. Manfred Gerner, *Maisons à colombages : structure, rénovation* (Paris : Eyrolles, 1980), 60.

5. Burghard Lohrum et al., *La maison en pan-de-bois*, Clefs du patrimoine d'Alsace 1 (Lyon : Lieux dits, 2015), 24.

6. Association française du génie parasismique, *Guide de la conception parasismique des bâtiments,* 80.

7. Ruch, *La maison alsacienne à colombage,* 44.

8. Association française du génie parasismique, *Guide de la conception parasismique des bâtiments,* 80.

9. *ibid*, 69-70.

10. Michel Dewulf, *Le torchis, mode d'emploi*, Chantiers pratiques (Paris : Eyrolles, 2007), 26.

11. Ruch, *La maison alsacienne à colombage,* 14.

12. « Cecobois ». s. d. Cecobois. Consulté le 3 décembre 2017. https://www.cecobois.com/comportement-au-feu.

13. Franz Volhard, *Bauen mit Leichtlehm: Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm*, 8., neu bearbeitete und ergänzte Auflage (Basel, © 2016: Birkhäuser, 2016), 198.

14. *ibid*, 135.

15. *ibid*, 188.

16. *ibid*, 180.

17. Gerner, *Maisons à colombages, 9*.

18. Malek Jedidi et Omrane Benjeddou, *La thermique du bâtiment : du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation*, Technique et ingénierie. Froid et génie climatique (Paris : Dunod, 2016), 145.

19. Volhard, *Bauen mit Leichtlehm,* 185.

20. Traduction libre de *« Eine Wand mit großer Wärmespeicherwirkung bewirkt eine große Verzögerung des Wärmedurchgangs (Phasenverschiebung), eine gut wärmedämmende Wand dämpft die Temperaturschwankungen (Amplitudendämpfung) ».* Gernot Minke, *Handbuch Lehmbau: Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur*, 8. verb. Aufl. (Staufen bei Freiburg: Ökobuch, 2012), 31.

21. Luc Floissac, *La construction en paille : principes fondamentaux, techniques de mise en oeuvre, exemples de réalisations* (Mens : Terre vivante, 2012), 34.

LES INNOVATIONS D'AUJOURD'HUI
- ETUDE DE CAS II -

22. Volhard, *Bauen mit Leichtlehm,* 8.

23. Mario Rodriguez, « Confined Masonry Construction » (World Housing Encyclopedia, 2007), 2, http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/Confined-Masonry_Rodriguez.pdf.

24. Laurie Winkless, « These Houses Are Built With Blocks Made From Waste Plastic », Forbes, consulté le 22 décembre 2017, https://www.forbes.com/sites/lauriewinkless/2016/07/21/these-houses-are-built-with-blocks-made-from-waste-plastic/.

25. Silke Krüger, *Stampflehm: Renaissance einer alten Technik* (Aachen: Manudom-Verl, 2004), 10.

LES POSSIBILITES DE DEMAIN

26. Klaus Göbel et Konrad Gatz, *Constructions en brique : maisons d'habitation, résidences, églises et bâtiments divers* (Paris : Eyrolles, 1971), 21.

27. *ibid*, 23.

28. Stephan Engelsmann et al., *Plastics: In Architecture and Construction* (Basel: Birkhäuser, 2010), 9.

29. *ibid*, 161.

30. Jean-Luc Buchner cité dans « Riquewihr : la reconstruction menacée », consulté le 27 novembre 2017, http://www.lalsace.fr/haut-rhin/2015/09/29/riquewihr-la-reconstruction-menacee.

31. Adolf Loos, 1913, cité dans Volhard, *Bauen mit Leichtlehm*, 11.

BIBLIOGRAPHIE ALPHABETIQUE

LIVRES

Association française du génie parasismique. ***Guide de la conception parasismique des bâtiments***. Paris: Éditions Eyrolles, 2004.

Dewulf, Michel. ***Le torchis, mode d'emploi***. Chantiers pratiques. Paris: Eyrolles, 2007.

Engelsmann, Stephan, Valerie Spalding, Stefan Peters, et Ria Stein. ***Plastics: In Architecture and Construction***. Basel: Birkhäuser, 2010.

Floissac, Luc. ***La construction en paille: principes fondamentaux, techniques de mise en oeuvre, exemples de réalisations***. Mens: Terre vivante, 2012.

Frey, Pierre. ***Learning from Vernacular: Towards a New Vernacular Architecture***. Arles: Actes sud, 2010.

Gerner, Manfred. ***Maisons à colombages: structure, rénovation***. Paris: Eyrolles, 1980.

Göbel, Klaus, et Konrad Gatz. ***Constructions en brique: maisons d'habitation, résidences, églises et bâtiments divers***. Paris: Eyrolles, 1971.

Jedidi, Malek, et Omrane Benjeddou. ***La thermique du bâtiment: du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de climatisation***. Technique et ingénierie. Froid et génie climatique. Paris: Dunod, 2016.

Krüger, Silke. ***Stampflehm: Renaissance einer alten Technik***. Aachen: Manudom-Verl, 2004.

Lohrum, Burghard, Maxime Werlé, Jérôme Raimbault, Florent Fritsch, Olivier Haegel, Christophe Hamm, Frédéric Harster, et Audrey Schneider. ***La maison en pan-de-bois***. Clefs du patrimoine d'Alsace 1. Lyon: Lieux dits, 2015.

Minke, Gernot. ***Handbuch Lehmbau: Baustoffkunde, Techniken, Lehmarchitektur***. 8. verb. Aufl. Staufen bei Freiburg: Ökobuch, 2012.

Ruch, Maurice. ***La maison alsacienne à colombage***. Paris: Berger-Levrault, 1977.

Volhard, Franz. ***Bauen mit Leichtlehm: Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm***. 8., Neu bearbeitete und ergänzte Auflage. Basel, © 2016: Birkhäuser, 2016.

ARTICLES

Rodriguez, Mario. « Confined Masonry Construction ». World Housing Encyclopedia, 2007. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/05/Confined-Masonry_Rodriguez.pdf.

Winkless, Laurie. « These Houses Are Built With Blocks Made From Waste Plastic ». Forbes. Consulté le 22 décembre 2017. https://www.forbes.com/sites/lauriewinkless/2016/07/21/these-houses-are-built-with-blocks-made-from-waste-plastic/.

« Riquewihr : la reconstruction menacée ». Consulté le 27 novembre 2017. http://www.lalsace.fr/haut-rhin/2015/09/29/riquewihr-la-reconstruction-menacee.

SITE WEB

« Cecobois ». Cecobois. Consulté le 3 décembre 2017. https://www.cecobois.com/comportement-au-feu.

CREDITS PHOTOGRAPHIQUES

INTÉRIEUR DE L'OEUVRE
TOUTES LES ILLUSTRATIONS NON RÉFÉRENCÉES SONT DE L'AUTEUR

1. Ecomusée d'Alsace, et Marc Grodwohl. *Expériences constructives: Festival international de la maison.* S.l.: s.n., 2005.

2. « Maison au 101 rue du Général-de-Gaulle à Kaysersberg ». 2017. *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Maison_au_101_rue_du_G%C3%A9n%C3%A9ral-de-Gaulle_%C3%A0_Kaysersberg&oldid=136256571

8. Maurice Ruch, *La maison alsacienne à colombage* (Paris : Berger-Levrault, 1977), p.46

16. Ruch, p.44

17. Ruch, p.47

18 Franz Volhard, *Bauen mit Leichtlehm: Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm,* 8., neu bearbeitete und ergänzte Auflage (Basel, © 2016: Birkhäuser, 2016) p.96

22. Ruch, p.71

33. Anker, Albert. *allemand : Sonntag Nachmittag.* 1861. Peinture, 82 × 65 cm (32.3 × 25.6 in). Musée d'Art et d'Histoire de Neuchâtel. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anker_Sonntagnachmittag_1861.jpg?uselang=fr.

36a. « Light Straw Clay / Light Earth Houses ». Henderson Clayworks. Consulté le 23 novembre 2017. http://www.hcworks.org/lightstrawclayhouses/.

36b, 36c et 37d. « Schauer-Volhard_Architekten_Bauten_und_Projekte ». Consulté le 30 octobre 2017. http://www.schauer-volhard.de/Seiten/2Bauten_und_Projekte/0Projekte.html.

37a. « WHE Reports ». Consulté le 12 décembre 2017. http://db.world-housing.net/pdf_view/7/

37b. Source : Norris, Alastair. « Rebuilding Nepal | The RMS Blog ». Consulté le 27 décembre 2017. http://www.rms.com/blog/2017/12/15/rebuilding-nepal/.

37c et 37e. « El Instituto Phase II ». *B & K sin Fronteras* (blog), 7 septembre 2017. https://bksinfronteras.wordpress.com/2017/09/07/el-instituto-phase-ii/.

37d. « Echanger des savoirs pour reconstruire durablement ». Consulté le 20 décembre 2017. https://www.espazium.ch/echanger-des-savoirs-pour-reconstruire-durablement.

38a. « This House was Built in 5 Days Using Recycled Plastic Bricks », ArchDaily, 1 mai 2017, http://www.archdaily.com/869926/this-house-was-built-in-5-days-using-recycled-plastic-bricks.

38b et 38c. « Casas con ladrillos de plástico reciclado en Colombia », Arquitectura, 8 septembre 2016, https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/casas-con-ladrillos-de-plastico-reciclado-en-colombia.

38d. « Conceptos Plásticos: dándole valor constructivo a un material que contamina », *Futuro Verde* (blog), 7 octobre 2017, http://futuroverde.org/2017/10/07/conceptos-plasticos-dandole-un-valor-constructivo-a-un-material-que-contamina/.

39a, 39b et 39c. Source : « The Ricola Kräuterzentrum | Herzog & de Meuron ». *Arch2O.com* (blog), 29 octobre 2016. https://www.arch2o.com/ricola-krauterzentrum-herzog-de-meuron/.

50a. « Géoportail ». Consulté le 12 décembre 2017. https://www.geoportail.gouv.fr.

51. « Riquewihr, la perle du vignoble d'Alsace ». Blog Vialsace, 2 novembre 2017. http://blog.vialsace.eu/riquewihr-perle-du-vignoble/.

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

ENONCÉ THÉORIQUE DE MASTER D'ARCHITECTURE 2017-18

présenté par

Mathieu FRITZINGER

professeur responsable de l'énoncé

Corentin FIVET

directeur pédagogique

Nicola BRAGHIERI

maître epfl

Sara FORMERY

Ouvrage reproduit et achevé d'imprimer en janvier 2018 par l'imprimerie REPRO - Centre d'impression Lausanne sur papier recyclé cyclus 115 g

TIRAGE N° ....

JANVIER 2018 | EPFL

"une nouvelle architecture vernaculaire peut apprendre des pratiques traditionnelles par osmose, par analogie, par réinterprétation ou par interpolation mais certainement pas par imitation."

Pierre Frey

Learning from Vernacular: Towards a New Vernacular Architecture
(Arles : Actes sud, 2010), p.45